

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ “ОДЕССКАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ”

На правах рукописи

ГОЛУБЕВ МАКСИМ ВИТАЛЬЕВИЧ



УДК 621.431.74+621.43.068.4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ
ОТРАБОТАВШИХ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ
УСТАНОВКИ

05.05.03 – двигатели и энергетические установки

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н, профессор
В. А. Голиков

Одесса – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 5 |
| ВВЕДЕНИЕ | 9 |
| РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧНОСТИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК..... | 16 |
| 1.1. Классификация основных технологических газообразных выбросов при эксплуатации судов | 16 |
| 1.2. Основные физические принципы процесса очистки выхлопных газов | 20 |
| 1.3. Современные технологические схемы судовой энергетической установки..... | 26 |
| 1.4. Состояние проблемы абсорбционной очистки уходящих выхлопных газов | 32 |
| 1.5. Факторы, влияющие на скорость очистки выхлопных газов | 38 |
| 1.6. Выводы по разделу 1..... | 43 |
| РАЗДЕЛ 2. ВЫБОР ТЕМЫ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 46 |
| 2.1. Выбор темы исследования | 46 |
| 2.2. Цель и задачи исследования..... | 50 |
| 2.3. Специфика взаимодействия движущегося потока газа с неподвижной жидкостью..... | 55 |
| 2.4. Технология диссертационного исследования | 60 |
| 2.5. Описание научно-исследовательской установки..... | 64 |
| 2.6. Характеристики приборов и анализ погрешностей измерения основных параметров процесса обработки выхлопных газов | 67 |
| 2.7. Выводы по разделу 2..... | 72 |
| РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И СПЛОШНОСТИ ПОТОКА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ..... | 74 |
| 3.1. Разработка математической модели процессов фильтрации и охлаждения пузырьков выхлопных газов в неподвижной жидкости | 74 |

| | |
|---|------------|
| 3.2. Применение метода конечных разностей для численного моделирования процессов тепломассопереноса и определения геометрических характеристик фильтро-охлаждающего элемента..... | 83 |
| 3.3. Разработка рекомендаций по проведению натурных исследований процессов очистки выхлопных газов в судовых условиях | 92 |
| 3.4. Выводы по разделу 3 | 95 |
| РАЗДЕЛ 4. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФИЛЬТРО-ОХЛАЖДАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ОБРАБОТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ | 97 |
| 4.1. Прогностическая оценка степени влияния геометрической конфигурации фильтро-охлаждающего элемента на интенсивность процессов теплообмена в системе «газ-вода» | 97 |
| 4.2. Результаты экспериментальных исследований процессов фильтрации и охлаждения выхлопных газов | 104 |
| 4.3. Принцип работы фильтро-охлаждающей установки, интегрированной в технологический контур судового главного дизеля | 110 |
| 4.4. Выводы по разделу 4..... | 112 |
| РАЗДЕЛ 5. ПРИНЦИП РАБОТЫ И МЕТОДИКА ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО РАСЧЕТА, КОНСТРУИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ФИЛЬТРО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ..... | 114 |
| 5.1. Расчетная математическая модель процесса очистки выхлопных газов.... | 114 |
| 5.2. Техничко-эксплуатационные требования к автоматизации ФОРУ, разработка и экспериментальная проверка качества управления процессом фильтрации и охлаждения выхлопных газов судового дизеля | 127 |
| 5.3. Техничко-эксплуатационные требования к конструкции фильтро-охлаждающей установки | 133 |
| 5.4. Особенности технологических операций по изготовлению и монтажу судовой фильтро-охлаждающей установки | 134 |
| 5.5. Общие требования к эксплуатации и управлению фильтро-охлаждающей установкой | 140 |

| | |
|--|-----|
| 5.6. Выводы по разделу 5 | 144 |
| ВЫВОДЫ | 146 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 148 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 159 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | 163 |

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- J – распределение в потоке источников притока или стока массы;
- ρ – плотность, кг/м³;
- t – время, с;
- χ_m – массовая концентрация, %;
- μ – динамическая вязкость, Па·с;
- χ_o – секундная объемная концентрация выхлопных газов в воде, %;
- V^* – скорость диффузии i -й компоненты выхлопных газов в воду, м/с;
- D – коэффициент диффузии выхлопных газов в воду, моль/л;
- G – параметр эффективного градиента сдвига гидродинамического поля;
- V – скорость всплывания пузырьков выхлопных газов, м/с;
- g – ускорение сил тяжести, м/с²;
- ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;
- K_0 – коэффициент полидисперсности пузырьков выхлопных газов;
- $\sigma_{ж/г}$ – поверхностное натяжение на границе межфазного раздела, Дж/м²;
- P_z – внутреннее давление газа, Па;
- $P_{жс}$ – внешнее давление жидкости, Па;
- r – радиус пузырька, м;
- F_c – сила лобового гидродинамического сопротивления, Н;
- Re – число Рейнольдса;
- α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
- C_D – коэффициент лобового гидродинамического сопротивления;
- h – высота водяного столба внутри фильтрационной кассеты, м.в.ст.;
- z – текущая координата по высоте, м;
- $m_{воды}$ – масса вытесненного пузырьком объема воды, кг;
- m_z – масса газа в пузырьке выхлопных газов, кг;
- V – скорость подъема пузырька выхлопных газов в воде, м/с;
- t^* – время подъема пузырька выхлопных газов в фильтрационной колонне, с;

- S – площадь миделевого сечения пузырька, м^2 ;
- f – формпараметр пузырька выхлопных газов;
- J_m – коэффициент массопередачи водяной пленки, $\text{кг}/\text{м}^2$;
- C_n – концентрация газа при полном насыщении воды, %;
- C – текущая концентрация растворенного в жидкости газа, %;
- d_n – диаметр пузырька выхлопных газов, м ;
- D_t – коэффициент турбулентной диффузии выхлопных газов в воду, $\text{м}^2/\text{с}$;
- R_r – фактор обновления границы раздела фаз, с^{-1} ;
- S' – величина текущей поверхности межфазного раздела, м^2 ;
- A – работа, выполняемая в единицу времени на единице поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
- σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Дж}/\text{м}^2$;
- F_ζ – сила гидродинамического сопротивления, Н ;
- Δl – расстояние, пройденное пузырьком выхлопных газов за время Δt , м ;
- $S_{n.c.}$ – площадь поперечного сечения пузырька выхлопных газов, м^2 ;
- $S_{n.n.}$ – площадь поверхности пузырька выхлопных газов, м^2 ;
- Δm – общая масса составляющих выхлопных газов, растворившаяся в воде за время фильтрации Δt , кг ;
- $W_{n.n.}$ – объем пузырька выхлопных газов, м^3 ;
- ΔC – снижение концентрации компонент выхлопных газов, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- $\Omega_{n.n.}$ – относительный размер пузырька выхлопных газов, м^2 ;
- K_f – коэффициент фильтрации выхлопных газов, $\text{м}/\text{с}$;
- $C_{вх}$ – концентрация компонент выхлопных газов на входе в фильтрационную установку, %;
- $P(t)$ – давление в пузырьке при всплывании, Па ;
- R_i – текущий радиус пузырька, м ;
- $P'(t)$ – давление, затрачиваемое на взаимодействие пузырьков выхлопных газов при всплывании, Па ;
- ρ_n – концентрация (плотность распределения) пузырьков выхлопных газов в водяном объеме фильтрационной кассеты, м^3 ;

c – скорость звука в воде, м/с;

R_{max} – максимальный радиус пузырька выхлопных газов, м;

$P_{д.з.}^{max}$ – максимальное давление выхлопных газов в пузырьке, Па;

Δ_i – относительная погрешность i -го параметра, %;

Q_c – массовый расход твердых частиц сажи, кг/с;

G_m – расход мазута на сжигание, м³/с;

A – зольность мазута, %;

χ – константа, зависящая от типа дизеля и качества используемого мазута;

η – доля твёрдых частиц, улавливаемых в золоуловителях;

Q_{co} – массовый расход монооксида углерода, кг/с;

R_{co} – выход СО при сжигании топлива;

q_3 – потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива;

$Q_{н.с.}$ – низшая теплота сгорания топлива;

q_4 – потери теплоты вследствие механической неполноты сгорания топлива, %;

Q_{SO_x} – массовый расход окислов серы, кг/с;

N_{Sr} – исходное содержание серы в топливе, %;

N_{SO_x} – доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива, %;

N'_{so_x} – доля улавливаемых оксидов серы, %;

Q_{NO_x} – массовый расход оксидов азота, кг/с;

N_{NO_x} – количество оксидов азота, образующихся на 1 ГДж теплоты при использовании топлива;

t', t'' – температура выхлопных газов на входе и выходе в установку, °С;

$P_{вх}$ – давление выхлопных газов на входе в установку, Па;

$d_{вх}$ и $d_{вых}$ – диаметры входного и выходного патрубков установки, м;

d_p – диаметр отверстий решетки для создания пузырьков, м;

N – число фильтро-охлаждающих элементов, шт;

$P_{ст}$ – гидростатическое давление, Па;

$W_{p.k.}$ – объем рабочей камеры фильтрационной кассеты, м³;

$Q_{в.в.}$ – массовый расход выбрасываемых в атмосферу вредных веществ, кг/с;

$S_{p.k.}$ – площадь основания рабочей камеры фильтрационной кассеты, м²;

$W_{ф.в.}$ – объем фильтрационной воды, м³;

$P_{вых}$ – давление выхлопных газов на выходе из установки, Па;

Θ – параметр фильтрации;

$M_{в.г.}$ – массовый расход судовых выхлопных газов, кг/с;

M'_i, M''_i – массовый расход i -го компонента на входе и выходе в установку, кг/с;

n – число основных компонент судовых выхлопных газов;

C_m^i – максимальное значение приземной концентрации i -й компоненты вредных веществ (С, СО, SO₂, NO, NO₂), %;

A_t – коэффициент температурной стратификации атмосферы;

ψ – коэффициент оседания вредных веществ в окружающем пространстве;

k_1 и k_2 – коэффициенты, учитывающие условия выброса выхлопных газов;

H – высота дымовой трубы судна над уровнем воды, м;

ϑ – коэффициент влияние рельефа дна;

ΔT – разность между температурами выбрасываемых выхлопных газов и окружающей среды, °С;

$Q_{д.т.}$ – расход выхлопных газов на выходе из судовой дымовой трубы, м³/с;

L_m – расстояние от судовой дымовой трубы до места максимального значения приземной концентрации i -й компоненты вредных выбросов, м;

ПДВ ^{i} – предельно допустимый выброс i -й компоненты вредных веществ;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

$C_{ф}^i$ – фоновая концентрация i -й компоненты вредных выбросов;

$W_г$ – объем растворенного газа, м³;

$W_{ж}$ – объем жидкости, м³;

k – коэффициент растворимости;

$P_{ж}$ – давление в жидкости, Па;

P_a – атмосферное давление, Па.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В течение последних трех десятилетий ведущие дизелестроительные компании мира осуществляют исследования по повышению экологичности судовых двигателей, работающих на высоковязких (тяжелых) сортах топлива. После сгорания этого топлива в атмосферу выбрасывается значительное количество вредных веществ.

Современные требования по ограничению выбросов NO_x и SO_x регламентированы приложением VI конвенции МАРПОЛ, принятой Международной морской организацией (ИМО). Они касаются специальных районов по контролю за выбросами серы (Sulfur Emission Control Area – SECA), в которых нормы выброса значительно снижены (NO_x до 3,4 г/кВт·ч, SO_x до нуля), а количество таких районов растет с каждым годом.

В процессе инновационной деятельности по модернизации судовых дизелей основное внимание ученых вначале обращалось на экономические показатели судовых установок, затем на надежность, а с переходом двигателей на тяжелые сорта топлива – на экологичность.

Технологические схемы очистки выхлопных газов (ВГ) судовых тепловых двигателей обеспечивают: механическую очистку CO_x с использованием поверхностно-активных веществ, примесей NO_x – до 90%, используя, например, катализатор – аммиак (метод SCR), примесей SO_x – на стадиях топливоподготовки и при сгорании топлива при генерации механической энергии.

Ввиду необходимости более глубокой очистки выхлопных газов актуальной становится проблема их фильтрации и охлаждения на научно-методологическом, технологическом и конструктивном уровнях.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа направлена на реализацию Транспортной стратегии Украины до 2020 года (распоряжение Кабинета Министров Украины №2174-р от 20 октября 2010 г.), Закона Украины «Про основы государственной экологической политики на период до 2020

года» (№ 2818-VI от 21 декабря 2010 г.) и выполнялась в рамках НИР в НУ «ОМА» «Развитие современной теории и практики технической эксплуатации морского и речного флота: концепции, методы, технологии», ГР №0114U000346 (2014-2017 гг.). В отчете о НИР автору принадлежит отдельный раздел: «Исследование эффективности процессов очистки отработавших выхлопных газов судовых дизелей».

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является повышение эффективности очистки отработавших выхлопных газов судового дизеля до современных требований.

Рабочая гипотеза исследования состоит в том, что на всех эксплуатационных режимах работы судового дизеля существует возможность интенсификации процессов одновременных фильтрации и охлаждения выхлопных газов при барботаже в воде.

Главная задача диссертационной работы заключается в создании принципа работы фильтро-охлаждающей установки (ФОУ) выхлопных газов судового дизеля с последующей разработкой методики построения ее технологической схемы, конструктивных решений и эксплуатации.

Для ее реализации требуется выполнение трех вспомогательных задач:

- анализа процессов тепломассообмена и сплошности потока пузырьков выхлопных газов барботирующих в слое воды системы «газ-вода»;
- оценки степени влияния геометрических размерений фильтро-охлаждающего элемента (ФОЭ) обработки выхлопных газов на интенсивность процессов тепломассообмена;
- разработки конструктивных решений по обеспечению физических условий: равномерности подачи потока газов на выходе из ФОЭ; предотвращения уноса воды газами на выходе из него, а также интенсификации межфазного взаимодействия в системе «газ-вода» при барботаже.

Объект исследования – процесс выпуска отработавших газов судового дизеля.

Предметом исследования – процессы фильтрации и охлаждения потока выхлопных газов.

Методы исследования, используемые в работе:

- дедукции – при информационном поиске;
- экспертного оценивания – при выборе темы исследования;
- системного анализа – при разработке методологии и технологической карты исследования;
- математического моделирования – при теоретическом исследовании процессов тепломассообмена в системе «газ-вода»,
- конечных разностей – при численном исследовании процессов фильтрации и охлаждения;
- натуральных экспериментов – в ходе построения и исследования ФОЭ и ФОУ;
- статистической обработки данных – при оценке погрешностей измерений и расчетов, а также оценке эффективности работы ФОЭ;
- конструктивные – при разработке судовой автоматизированной ФОУ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что повышение эффективности очистки ВГ судового дизеля обеспечивается ФОУ, которая содержит параллельно работающие по принципу отклонения аэродинамической нагрузки ФОЭ и сохранения тепломассообменных (температуры и кислотности) свойств воды на выходе каждого из них. При этом методика конструирования ФОУ и ФОЭ отличает выбор эффективного режима барботажа в системе «газ-вода» в замкнутом пространстве ФОЭ.

В процессе исследования были впервые получены следующие научные результаты:

- математическая модель процессов фильтрации и охлаждения, представленная материальной точкой в пространстве, характеризующая межфазное взаимодействие в системе «газ – вода» при барботаже по массе, температуре и текущей концентрацией компонентов очищаемого газа;

– математическая модель процессов фильтрации и охлаждения выхлопных газов, представленная материальной точкой на отдельных поперечных сечениях замкнутого пространства, отражающая изменение текущей концентрации вредных примесей;

– одновременное управляемое протекание процессов фильтрации и охлаждения выхлопных газов обеспечивается барботирующим слоем воды, равным 0,85 относительной длины ФОЭ, при котором скорость диффузии компонентов газа и темп охлаждения становятся минимальными;

– интенсификация поверхностного теплообмена и массопередачи достигается конструктивным удвоением эффективного пути потока пузырьков газа (установка направляющих пластин под углом 30°) и ограничением максимального диаметра пузырьков до 5 мм на входе в ФОЭ (установка распределительной решетки) и предотвращением уноса капель воды с выхлопными газами (установка каплеклапанивателя);

– снижение температурного градиента газов на 30%, концентрации NO_x на 99,7% и концентрации SO_x на 97,7% на выходе из ФОУ достигается за счет обеспечения требуемого значения площади межфазного взаимодействия $9 \text{ м}^2/(\text{м}\cdot\text{с}^{-1})$ в барботажном слое воды, заполняющем камеру ФОЭ;

– принцип управления работой ФОУ определяется тремя нормируемыми параметрами эффективности процессов фильтрации и охлаждения, поддержание которых обеспечивается:

- объемный расход выхлопных газов на входе в ФОЭ в диапазоне 2-5 $\text{м}^3/\text{с}$ на всех режимах работы дизельной установки – управляемым изменением числа параллельно работающих ФОЭ пропорционально перепаду давления газов на входе и выходе из ФОЭ,

- концентрация NO_x и SO_x – управляемой заменой фильтрационной воды в камере ФОЭ при отклонении значения ее кислотности (то есть значение pH) от начального,

- температурный градиент газов – управляемой заменой фильтрационной воды в камере ФОЭ при превышении значения ее температуры в 98 °С.

Получили дальнейшее развитие теоретические особенности взаимодействия многофазных газообразных и однофазных жидких сред.

Практическая ценность полученных результатов заключается в повышении эффективности очистки отработавших выхлопных газов путем разработанных:

- судовой автоматизированной системы фильтрации выхлопных газов;
- методики проектирования ФОУ очистки выхлопных газов, интегрированной в технологическую схему судового главного дизеля;
- способе автоматического управления процессами фильтрации и охлаждения в установке очистки выхлопных газов;
- комплексе основных операций по изготовлению, монтажу и ремонту конструкции ФОУ выхлопных газов судового дизеля.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются в следующих организациях:

- судоходной компании ТВ Marine Hamburg (акт от 27.08.2014), что позволило снизить температуру выбрасываемых в атмосферу судовых выхлопных газов в среднем в 1,5 раза, а снижение выбросов SO_x при работе судна на высокосернистом топливе до показателей, соответствующих использованию низкосернистого топлива;
- НУ «ОМА» – в учебном процессе при проведении лекционных занятий по дисциплинам оптимизация режимов работы судовых энергетических установок и техническая эксплуатация судовых энергетических установок (акт от 11.01.2016);
- НУ «ОМА» – в НИР «Развитие современной теории и практики технической эксплуатации морского и речного флота: концепции, методы, технологии» (акт от 21.01.2016).

Персональный вклад соискателя. В научных статьях, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие результаты: [12] – выполнен анализ структуры мирового транспортного флота и сформулированы основные направления в разработке новых технологий для судовой энергетики;

[13] – выполнена постановка задач исследований, а также сформулирована и описана общая функциональная схема ресурсосберегающей судовой энергетической установки; [14] – выполнен аналитический обзор допустимых границ выбросов для основных составляющих ДГ и описана технологическая схема их очистки; [25] – результаты экспериментального исследования установки очистки выхлопных газов судового дизеля.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы и отдельные ее разделы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на научно-технических конференциях: международного, Всеукраинского и вузовского уровней: International scientific-practical conference «Safety of shipping and human element», 5-8 августа 2004 г.; Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій (ISDMIT'2005)», Євпаторія, 18-21 мая, 2005 г.; Міжнародній науковій та науково-методичній конференції «Сучасні проблеми суднової енергетики – 2007», Одеса, 15-17 мая 2007 г.; XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Севастополь, 25-28 июня 2013 г.; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Управління проектами в умовах транзитивної економіки», Одеса, 13-14 декабря 2013 р.; Всеукраинской научно-практической конференции «Современные энергетические установки на транспорте, технологии и оборудование для их обслуживания СЭУТТОО-2013», Херсон, 2013; 6-тій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні порти – проблеми та рішення», Іллічевск, 2014 г.; 5-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2014». – Херсон, 2014.

Публикации. Основные положения и научные результаты работы отражены в 15 публикациях, в частности 7 научных статьях, опубликованных в изданиях, входящих в перечень МОН Украины для публикации результатов диссертационных исследований, из них 2 в изданиях, которые индексируются международными наукометрическими базами, и 8 материалах конференций.

Структура работы. Работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы из 109 наименований и 2 приложений. Полный объем работы составляет 165 стр., из которых 158 стр. – текст диссертации, рисунки на 35 стр., таблицы на 9 стр. и 2 приложения на 7 стр.

РАЗДЕЛ 1

ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧНОСТИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В настоящее время доля дизельных двигателей в судовых энергетических установках составляет 90% от количества судов мирового флота. Ведущими мировыми производителями судовых дизельных энергетических установок являются: “Mitsubishi Heavy Industries Ltd”, (Япония) – 10% мирового производства; “Wartsila Switzerland Ltd” (Швейцария) – 25 % мирового производства; «Bürmeister and Wain» (Дания); MAN (Германия); «Doksford» (Великобритания); «Stork» (Нидерланды); «Getaverken» (Швеция); «Fiat» (Италия); «Pillstick» (Франция) [12-13]. Выпускаемые ими дизеля отличаются, как по конструктивным, так и по эксплуатационным характеристикам, но при использовании идентичного по характеристикам сорта топлива общими у них являются составы выбрасываемых в атмосферу выхлопных газов.

1.1. Классификация основных технологических газообразных выбросов при эксплуатации судов

При работе судна могут возникать газообразные технологические выбросы двух видов – озоноразрушающие технологические газы и продукты сгорания топлива.

Первый вид выбросов связан с присутствием веществ, к которым, согласно пункту 4 статьи 1 Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой, 1987 года, в основном относятся различные холодильные агенты судовых систем кондиционирования и охлаждения. В перечень основных газов входят [101, 107]:

- хлорпентафторэтан (газ рефрижераторный R 115);
- бромхлордифлорметан (хладон 12В1);

- бромтрифторметан (хладон 13B1);
- трихлорфторметан (фтортрихлорметан, фреон R11, фреон-11, хладон-11, CFC-11, R-11);
- 1,2-дибром-1,1,2,2-тетрафторэтан (фреон 114B2);
- гидрохлорфторуглероды (хладагенты: R21, R22, R141b, R142b, R123, R124);
- дихлордифторметан (хладагент хладон-12);
- 1,1,2-трихлор-1,2,2-трифторэтан (хладагент К 113);
- 1,2-дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан (газ рефрижераторный R 114).

Второй вид выбросов включает в себя все компоненты продуктов сгорания тепловых двигателей. По требованиям нормативных документов концентрация вредных примесей при выбросе в окружающую среду определяется для каждой компоненты индивидуально [92]. Наиболее токсичными компонентами являются оксиды азота (NO_x), и их концентрация в выхлопных газах зависит от конструкции дизеля. Допустимые границы выбросов для основных компонент выхлопных газов, возникающих при работе судового дизеля должны быть меньше значений, приведенных в таблице 1.1 [44].

При работе судовых дизелей безвредные или нейтральные (N_2 , O_2 , CO_2 и H_2O) вещества в сумме составляют до 99% от общего объема выхлопных газов. Остальные включают в себя окислы азота (NO_2), серы (SO_2), окись углерода (CO), углеводороды (C_2H_4) и частицы (сажа, зола) [14, 51].

Международным сообществом состав выбросов контролируется путем введения в обязательное исполнение различных норм и правил. На схематическом рис. 1.1 показаны районы контроля судовых газообразных выбросов, которые начиная с 2015 года находятся в зоне нормативного контроля выбросов.

При работе судна, согласно основным регламентирующим документам [27, 35, 44, 69, 105] для постоянного контроля выбросов продуктов сгорания используются значения концентрации двух основных химических газообразных соединений – оксидов азота (NO_x) и комбинации оксидов серы (SO_x) с твердыми частицами.

Таблица 1.1

**Состав и допустимые границы выбросов основных
компонент судовых выхлопных газов СЭУ [44]**

| Наименование компоненты | Содержание по объему, % | Допустимые границы выбросов, г/кВт·ч | Токсичность |
|---|-----------------------------|---|-------------|
| Диоксид азота, NO ₂ | 76 - 78 | Малооборотный дизель: 20, среднеоборотный: 10 | Не токсичен |
| Оксид азота, NO | | 75 | |
| Кислород, O ₂ | 2 - 18 | 12,3 | Не токсичен |
| Пары воды, H ₂ O | 0,5 - 4 | 6 | Не токсичны |
| Диоксид углерода, CO ₂ | 1 - 10 | 5,6 | Не токсичен |
| Оксид углерода, CO | 0,01 – 5 | 0,6 | Токсичен |
| Углеводороды не канцерогенные, СН | 0,009 – 0,5 | 0,4 | Токсичны |
| Альдегиды | 0,001 – 0,009 | | Токсичны |
| Оксид серы, SO ₂ | 0 – 0,03 | 12 | Токсичен |
| Сажа | 0,01 – 1,1 г/м ³ | 0,05 | Токсична |
| Бензопирен, | до 0,01 мг/м ³ | | Канцероген |
| Инертные газы | | 0,9 | Не токсичны |

Содержание допустимого полного взвешенного выброса оксидов азота и оксидов серы в комбинации с твердыми частицами варьируется для судов в зависимости от годов их постройки. Для различных диапазонов частоты вращения коленчатого вала судового двигателя их численные значения приведены в сводной таблице 1.2.



Рис. 1.1. Сводная характеристика районов контроля судовых газообразных выбросов

Таблица 1.2

Нормативные значения выбросов продуктов сгорания [44]

| Дата постройки судна | Частота вращения вала двигателя, об/мин | NO ₂ , г/кВтч | SO ₂ , г/кВтч |
|----------------------------|---|--------------------------|--------------------------|
| 1.01.2000 г.- 1.01.2011 г. | $n < 130$ | 117 | 4,5 |
| 1.01.2000 г.- 1.01.2011 г. | $130 < n < 2000$ | $45 \cdot n^{(-0,2)}$ | - |
| 1.01.2000 г.- 1.01.2011 г. | $n > 2000$ | 9,8 | - |
| После 1.01.2011 г. | $n < 130$ | 14,4 | 3,5 |
| После 1.01.2011 г. | $130 < n < 2000$ | $44 \cdot n^{(-0,23)}$ | - |
| После 1.01.2011 г. | $n > 2000$ | 7,7 | - |
| После 1.01.2016 г. | $n < 130$ | 3,4 | 0 |
| После 1.01.2016 г. | $130 < n < 2000$ | $9 \cdot n^{(-0,2)}$ | - |
| После 1.01.2016 г. | $n > 2000$ | 2 | - |

1.2. Основные физические принципы процесса очистки выхлопных газов

При рассмотрении физических принципов очистки выхлопных газов была использована известная классификация их фазового состава [33, 58], в соответствии с которой их подразделяют на аэрозоли, представляющие собой двухфазный поток, в котором сплошная фаза, т.е. дисперсионная среда, соответствует дымовым газам, а дисперсная фаза соответствует включенным в поток твердым частицам.

В зависимости от фракционного состава дисперсной фазы аэрозоли подразделяют на [84]:

- пыль (размер включений твердых частиц от 5 до 50 мкм);
- дым (размер включений твердых частиц от 0,1 до 5 мкм);
- туман (размер включений твердых частиц 0,3–5 мкм).

Во время эксплуатации судовой энергетической установки чаще всего возникает фракционный состав частиц сажи (98-99%), соответствующий дыму и туману. Именно они и обуславливают понятие дымности газов. Не смотря на безвредность сажа может адсорбировать на своей поверхности токсичные вещества типа бензапирена и др., а также имеет неприятный запах [72].

При анализе методов, которые используются для очистки выхлопных газов была составлена их общая классификация (рис. 1.2). Как видно из схемы существует три независимых метода. Первые два отличаются между собой наличием жидкой фазы, как одной из составляющих процесса очистки выхлопных газов, а третий основан на использовании специфических особенностей электрического поля.

В практике эксплуатации судов чаще всего применяется влажный метод. В этом методе взаимодействие выхлопных газов осуществляется с жидкостью. Осаждение частиц примеси происходит на капли, на поверхность паровых пузырей или на пленку стекающей жидкости. Большинство очистных установок работают с использованием принципа капельной очистки и, как результат их применения – выбросы NO_x могут быть снижены до нормативных значений [5, 6, 101]. В силу сложности конструктивного исполнения пленочных очистных устройств они используются на судах

значительно реже. Главным достоинством пленочных очистителей является возможность полного удаления из потока взвешенных частиц сажи.

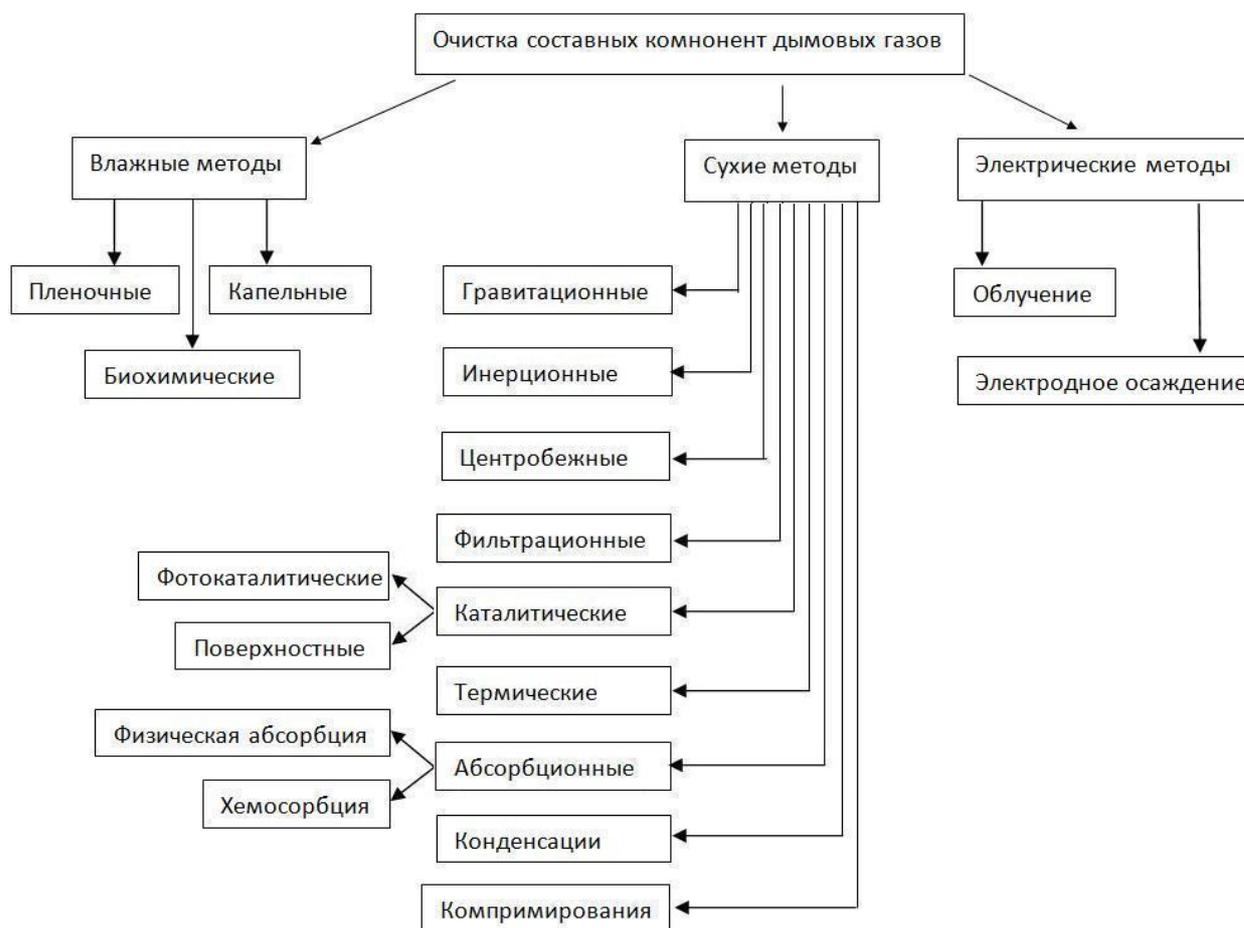


Рис. 1.2. Классификация методов очистки выхлопных газов

К влажным методам относят и биохимический метод, в котором микроорганизмы за счет своих ферментов перерабатывают различные химические соединения. В биофильтрах или в биоскруберах очищаемый газ орошается водой через систему насадок, покрытых биологически активным слоем из микроорганизмов. Вблизи насадок создается влажность, достаточная для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов в ходе которой наблюдается рост их массы. Для работы на судах этот метод в силу малой производительности и высоких экономических затрат практически не используется.

Сухие методы нашли наибольшее распространение на судовых установках большой производительности. Как видно на схеме к ним относят: гравитационные, инерционные, центробежные, фильтрационные, каталитические, термические и абсорбционные методы, а также методы конденсации и компримирования.

Гравитационный метод использует эффект осаждения взвесей под действием их массы, или, что то же – силы тяжести. В пылеосадительных камерах обычно улавливаются частицы, размером 40-1000 мкм.

Центробежный метод использует эффект отбрасывания частиц под действием сил инерции, вызываемых центростремительным ускорением. В циклонах диаметром от 1 до 2 м задерживаются частицы размером 5 – 1000 мкм. В скруберах, обычно конструктивно представляющих собой комбинацию трубы Вентури и циклона улавливаются частицы 20 – 100 мкм.

В фильтрационных методах используются различные фильтры, размер пропускных ячеек которых соответствует размеру улавливаемых частиц. Так, в тканевых фильтрах задерживаются частицы размером 0,9-100 мкм, а в волокнистых фильтрах 0,05-100 мкм. У волокнистых фильтров по сравнению с обычными сорбционными материалами коэффициент массопередачи может быть больше в 10-100 раз [92].

В каталитических методах токсичные компоненты выхлопных газов на поверхности твердых катализаторов под действием проходящих химических реакций переходят в нетоксичные соединения. В фотокаталитическом методе используется облучение катализаторов на основе оксида титана TiO_2 при помощи ультрафиолетовых лучей. В применении к судам каталитические методы являются очень перспективными [91], поскольку позволяют полностью удалять из выхлопных газов оксиды NO_x , SO_x , CO_x .

В поверхностных каталитических методах обычно используются каталитические реакторы пластинчатого или сотового типа. Материалы, из которых они изготовлены, варьируются от необработанных природных минералов или простых массивных металлов до сложных соединений с заданным структурным составом и

строением. Наибольшей каталитической активностью характеризуются материалы с ионными или металлическими связями, т.е. те материалы, которые обладают сильными межатомными полями.

Чаще всего используют катализаторы, которые разделяются на четыре группы [10, 34, 62]:

– оксиды металла. Например, TiO_2 с активными компонентами: ванадием, молибденом или вольфрамом или V_2O_5 с малой концентрацией WO_3 , или SiO_2 , или MoO_3 ;

– цеолиты, представляющие собой сильно пористое кристаллическое природное вещество или синтетические алюмосиликаты;

– частицы оксида железа с тонким покрытием кристаллической пленкой из фосфата железа;

– активированный углерод (размолотый каменный или бурый уголь) обработанный в смеси с инертным материалом до состояния гранул.

К недостаткам метода можно отнести высокую стоимость катализаторов, сильную чувствительность рабочего процесса к температурному режиму очистки и высокие требования к отсутствию запыленности (механических включений) в обрабатываемом потоке. Также, если каталитическая обработка выхлопных газов идет при высоких температурах (800 – 1100 °С) то образуется большое количество закиси азота N_2O . В отличии от NO_x это соединение представляет собой тепличный и озоноразрушающий газ.

Основной термических методов является прямое сжигание выхлопных газов для отделения легко окисляемых токсичных примесей и получением в ходе термического окисления CO_2 и H_2O в рабочем диапазоне температур от 750 до 1200 °С. Поскольку термические методы применяются при высокой концентрации горючих органических загрязнителей или оксида углерода в уходящих выхлопных газах, то для использования на судах их можно считать неприемлемыми. Несмотря на свою простоту и легкую конструктивную реализацию, эти методы требуют дополнительного расхода топлива на поддержание факела (если концентрация горючих примесей

меньше нижнего предела воспламенения), наличие второй стадии очистки на основе абсорбционной или адсорбционной обработки. При их использовании невозможно удалить все компоненты выхлопных газов до уровня нормативно установленных значений концентрации. Также термический метод характеризуется принципиальными трудностями при дожигании SO_2 , поскольку в этом случае образуются вторичные загрязнители.

Основное назначение адсорбционных методов заключается в удалении из выхлопных газов газообразных и парообразных примесей, которые при прохождении через адсорбент задерживаются в его порах. В диапазоне температур от 170 до 510 °С адсорбционные методы позволяют получить высокую степень очистки по газообразным составляющим, но при этом не работают в случае высокой запыленности газов.

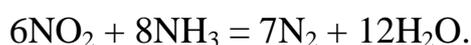
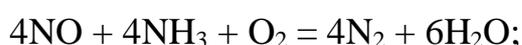
Адсорбционные методы подразделяют на:

– метод физической абсорбции, когда в качестве абсорбента используется химически нейтральное к составляющим выхлопных газов вещество. К таким веществам относятся: вода, органические растворители, водные растворы;

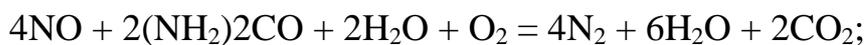
– метод хемсорбции, когда в качестве абсорбента используются водные растворы кислот, водные растворы щелочей, водные суспензии различных органических веществ, органические вещества и синтетические флокулянты. Эти абсорбенты реализуют процессы окисления до нитрит-нитрат-иона, с восстановлением до аммоний-иона и др.

В абсорбционных методах в большинстве случаев NO_x отбирают из выхлопных газов за счет взаимодействия с аммиаком, мочевиной и другими производными аммиака. Взаимодействие этих веществ с NO_x может происходить даже в присутствии кислорода.

При использовании аммиака (аммиачной воды) протекают следующие реакции:



При использовании мочевины имеют место следующие реакции:



В рассматриваемых методах на выходе из очистной установки нормативным значением концентрации аммиака является величина 2 ppm (0,0002 % от выбрасываемого объема выхлопных газов). Ее превышение служит аварийным сигналом для остановки процесса очистки.

В методах конденсации и компримирования используются различные конструктивно очень сложные установки, хотя принцип их работы практически полностью идентичен. Он основан на изменении давления насыщенных паров растворителя очищаемой компоненты выхлопных газов за счет варьирования значения рабочей температуры внутри установки. Смесь “растворитель-воздух” вначале подвергают предварительному охлаждению, а затем конденсируют с отбираемой из выхлопных газов компонентой [81]. В первом методе для паров растворителя используется пониженное давление, а во втором наоборот повышенное.

Основной недостаток этих двух методов заключается в высоком энергопотреблении и больших расходах холодильного агента (растворителя). Конденсацию растворителя возможно получать только в случае, когда его массовая концентрация в выхлопных газах составляет более 100 г/м³ (при меньших значениях он теряется безвозвратно), что экономически не целесообразно. В методе компримирования для улавливания получаемого осадка необходимо использовать дополнительный компримирующий узловой агрегат. По этим причинам в судовых условиях обработки выхлопных газов оба метода не могут быть использованы.

Электрические методы очистки выхлопных газов используют электрофильтры, принцип действия которых основан на поляризации анодами частиц аэрозоля и их последующем осаждении на катодах за счет действия электрического поля. При работе электрического фильтра обычно улавливаются частицы размером 0,01-10 мкм.

К числу электрических методов можно отнести и метод облучения потока уходящих выхлопных газов электронным пучком, который содействует протеканию химических реакций. Обычно используются барьерные, коронные или скользящие разряды. При прохождении выхлопных газов через высоковольтный разряд (низкотемпературную плазму) они подвергаются бомбардировке электронами и ионами, в ходе чего образуется атомарный кислород, озон, гидроксильные группы, возбужденные молекулы и атомы, которые и участвуют в плазмохимических реакциях с вредными примесями.

В этом методе восстановление NO_x и SO_x в химической реакции с аммиаком происходит без участия катализаторов, а только под действием излучения. Если используется в качестве катализатора аммиак, то конечным продуктом очистки являются сухой порошок неорганических солей: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{NH}_4\text{NO}_3$ и удаляемые выхлопные газы [10, 79].

Анализ всех достоинств и недостатков рассмотренных выше методов очистки выхлопных газов в применении к СЭУ показывает, что по-прежнему проблема очистки газов остается актуальной и нерешенной. Ни один из методов в условиях работы судна не позволяет быстро и качественно очистить выхлопные газы.

В большинстве случаев из-за сложного химического состава и высокой концентрации токсичных компонент используются многоступенчатые технологии очистки на основе комбинации вышеперечисленных методов. Наиболее характерным примером является адсорбционно-каталитическая очистка выхлопных газов, а самой перспективной является плазменно-каталитическая очистка, работающая в диапазоне температур от 40 до 100 °С.

1.3. Современные технологические схемы судовой энергетической установки

При проведении анализа многочисленных литературных источников [11-13, 74, 76, 80, 89 и др.], посвященных описанию существующих судовых схем регенерации тепла уходящих выхлопных газов, была составлена общая структурная технологическая схема. Она включает в себя все известные базовые элементы судовой

энергетической установки – котельную установку, дизельную установку, турбину, систему топливоподготовки, систему генерации электроэнергии и т.д. В схему также вошли все возможные технологические способы выработки и регенерации тепловой, механической и электрической энергии при работе судна [96, 107] (рис. 1.3). При

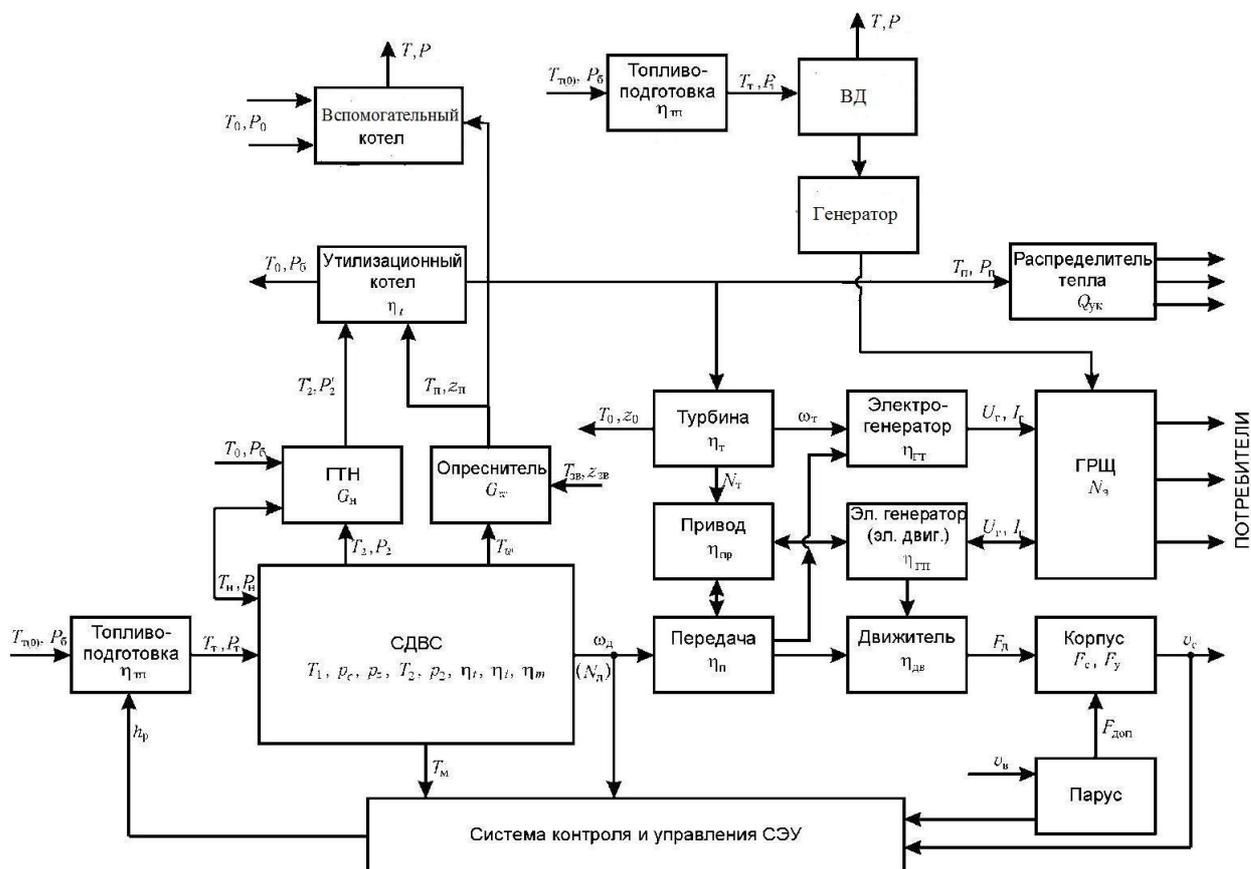


Рис. 1.3. Типовая схема судовой технологии регенерации

тепла уходящих выхлопных газов:

ГТН – газотурбонагнетатель;

СДВС – судовой двигатель внутреннего сгорания;

ГРЩ – главный распределительный щит;

ДГ – дизель-генератор;

ВД – вспомогательный дизель

разработке структурной технологической схемы был использован принцип функционирования всех возможных связей при использовании шести техно-

логических контуров. Пять, из описанных контуров являются взаимосвязанными и при некоторых режимах эксплуатации судна могут рассматриваться как взаимозаменяемые.

Первый технологический контур (рис. 1.4) предназначен для выработки в судовых условиях механической энергии за счет процесса сгорания топлива. В этом случае, как видно на схеме топливо, прошедшее процесс подготовки подается на судовой двигатель внутреннего сгорания или на судовой дизель-генератор. Предварительный процесс подготовки топлива подразумевает его разогрев до технологически установленного диапазона рабочих температур и увеличение давления до величины, соответствующей давлению подачи на главный двигатель или главную энергетическую установку.

В первом технологическом контуре при работе главной энергетической установки осуществляется преобразование энергии сгорания топлива в механическую энергию, которая передается на движитель судна. Движитель посредством валопровода приводит корпус судна в движение.

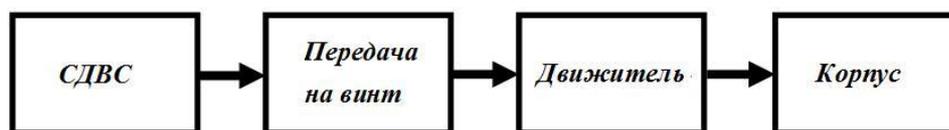


Рис. 1.4. Первый технологический контур

Второй технологический контур (см. рис. 1.5) подразумевает использование в условиях работы судна тепла уходящих выхлопных газов. Продукты сгорания поступают от главного двигателя в утилизационный котел, в котором вырабатывается водяной насыщенный пар. С утилизационного котла пар направляется на утилизационный турбогенератор в котором турбина за счет энергии пара вращает генератор, вырабатывающий электрическую энергию. Получаемая электроэнергия распределяется в последующем между всеми судовыми потребителями через главный распределительный щит.

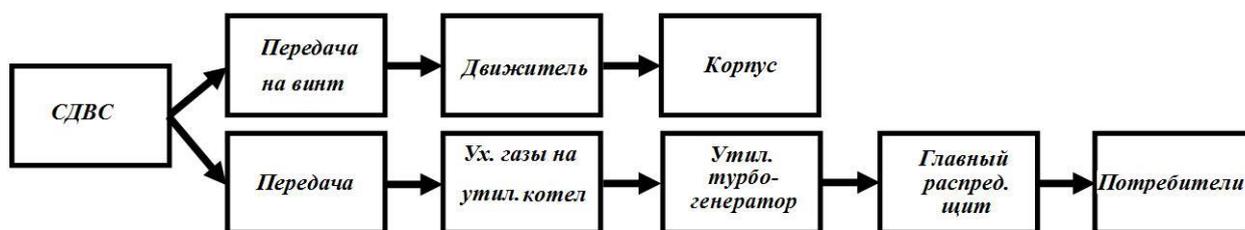


Рис. 1.5. Второй технологический контур

Третий технологический контур (рис. 1.6) предназначен для производства электрической энергии для судовых потребителей. При его введении в рабочий процесс используется вращение вала главного двигателя.

За счет использования редукторной связи крутящий момент от вала двигателя передается на валогенератор электродвигателя. При вращении ротора электродвигатель начинает вырабатывать электроэнергию с ее последующей передачей на главный распределительный щит, после которого она поступает к потребителям.



Рис. 1.6. Третий технологический контур

Четвертый контур (рис. 1.7) используется как контур регенерации тепла уходящих выхлопных газов. Вся тепловая энергия уходящих выхлопных газов из двигателя внутреннего сгорания используется в утилизационном котле, где за счет теплообменных процессов вырабатывается водяной насыщенный пар.



Рис. 1.7. Четвертый технологический контур

Перегретый водяной пар в последующем подается на вспомогательную турбину. За счет вращения отдельного привода турбины вся вырабатываемая энергия в виде крутящего момента через систему редукторов передается на движители судна – его винты.

Пятый технологический контур (рис. 1.8) также работает в режиме регенерации тепла уходящих выхлопных газов. В этом контуре вся тепловая энергия, которая вырабатывается судовым двигателем внутреннего сгорания, с выхлопными газами передается на утилизационный котел. В утилизационном котле происходит ее преобразование в энергию водяного насыщенного пара. Пар под давлением в зависимости от конструктивного исполнения судовой энергетической установки судна может в последующем подаваться или на турбину или, в случае его наличия на судне на утилизационный турбогенератор. При своем вращении турбина и/или турбогенератор вырабатывают электрическую энергию, которая передается через главный распределительный щит на электродвигатель. Электродвигатель после начала своей работы практически сразу начинает передавать энергию на вращение вала движителя судна посредством привода и редукторной передачи.

Последний шестой технологический контур (рис. 1.9), может рассматриваться, как независимый от общей системы пропульсивного комплекса судна. При этом этот технологический контур предназначен для непосредственной работы в составе судовой энергетической установки. Он работает следующим образом.

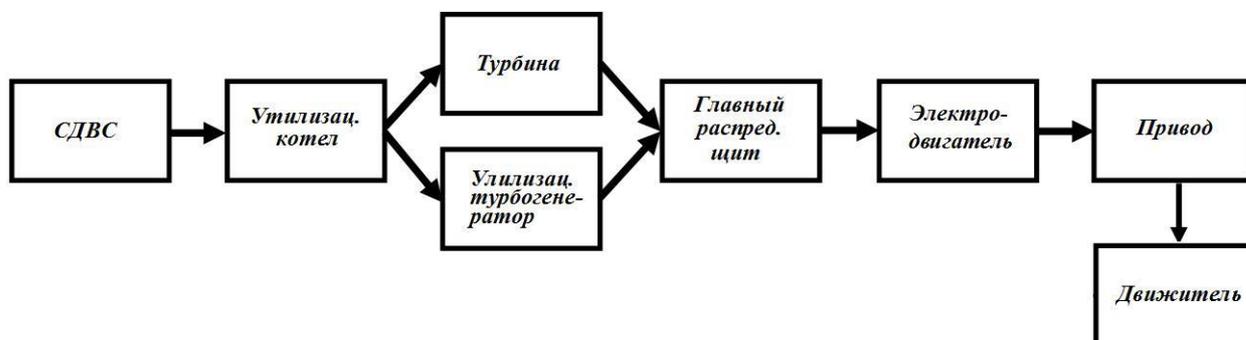


Рис. 1.8. Пятый технологический контур

Судовая вспомогательная дизельная установка при сжигании топлива вращает генератор электрической энергии. Вся вырабатываемая энергия передается на главный распределительный щит. Со щита в последующем по мере необходимости электроэнергия подается к конечным потребителям. Также энергия может подаваться на электродвигатель, который при своей работе через муфтовый привод приводит во вращение редукторную передачу, связанную с винтовым движителем судна.

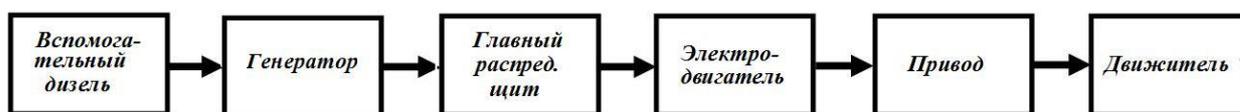


Рис. 1.9. Шестой технологический контур

Следует отметить, что общим для всех шести рассмотренных технологических контуров является правило выполнения энергетического баланса между судовым двигателем внутреннего сгорания, газотурбонагнетателем и утилизационным котлом. При их эксплуатации всегда должно выполняться равенство между затрачиваемой и потребляемой энергией во всех элементах судовой энергетической установки с учетом возможных суммарных механических и гидравлических потерь. Невыполнение этого равенства всегда свидетельствует о наличии:

- утечек выхлопных газов, приводящих к необратимым потерям энергии в контуре регенерации тепла;
- резкого изменения условий плавания судна (климатических условий, повышенной кратковременной ветровой нагрузки, волнения, течений и т.п.);
- обрастания корпуса;
- непостоянства частоты вращения вала двигателя при использовании комбинированной системы генерирования электрической энергии;
- паразитной обратной связи между исполнительными механизмами (неравномерность вращения винта, одновременное включение большого числа мощных потребителей энергии и т.п.) и двигателем внутреннего сгорания;

– тепловых потерь в контурах масляной и водяной системы охлаждения и смазки судового двигателя внутреннего сгорания.

1.4. Состояние проблемы абсорбционной очистки уходящих выхлопных газов

Процесс очистки выхлопных газов при прохождении через водяной фильтр представляет собой непрерывное изменение фазовой концентрации всей массы обрабатываемого газового потока в виде испарения и конденсации воды, а также изменения размеров пузырьков абсорбента при их разрушении или объединении. Он характеризуется высокими значениями коэффициентов межфазного переноса энергии и вещества, а также возможностью получения больших межфазовых поверхностей в единице объема среды.

Из-за нелинейности гидродинамических процессов при подъеме газы пузырьки движутся неустойчиво по различным отклоняющимся от вертикали траекториям, интенсивно циркулируя. По этой причине по всей высоте водяного столба средняя скорость движения выхлопных газов на порядки отличается от скорости всплывания одиночного газового пузырька.

Распространение малых возмущений внутри смеси воды с газовыми пузырьками описывается приближенной формулой Вуда [39]

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\alpha^2}{a_g^2} + \frac{(1-\alpha)^2}{a_w^2} + \frac{\alpha(1-\alpha)\rho_w}{p}, \quad (1.1)$$

где a – скорость распространения звука в смеси (индексы g и w соответственно в газе и воде); α – объемная концентрация газа; p – давление смеси; ρ_w – плотность воды.

Если объемная концентрация газа составляет $\alpha = 0,5$, а давление в воде составляет $P = 1$ бар, то минимальная скорость распространения возмущений будет 20 м/с, что почти в семьдесят пять раз меньше скорости звука в чистой воде (1500 м/с)

и в один раз меньше скорости звука в воздухе (340 м/с). При этом рост концентрации газа приводит к падению степени влияния возмущений в газожидкостной смеси [39].

Распределение в потоке источников притока или стока массы должно описываться заранее заданной интенсивностью секундного изменения массы, отнесенной к объему ее прироста (уменьшения) $J = \frac{\rho}{t}, \left[\frac{кг}{м^3 с} \right]$. Динамика переменной газозвушной массы описывается уравнением неразрывности потока переменной массы:

$$J = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{d\rho V_x}{dx} + \frac{d\rho V_y}{dy} + \frac{d\rho V_z}{dz}. \quad (1.2)$$

Процесс подъема пузырька в неподвижной жидкости, когда действующее на него давление считается равновесным, общая масса выхлопных газов внутри пузырька пропорциональна величине его начального объема. В этом случае плотность аккумулированной в пузырьке энергии не зависит от его начального радиуса [87]. При фильтрации выхлопных газов в воде, ее качественный состав и характеристики постоянно изменяются.

Плотность смеси воды с выхлопными газами может быть найдена путем суммирования составляющих ее i -х компонент

$$\rho = \sum_i \rho_i, \quad (1.3)$$

а массовая концентрация χ_m представляет отношение плотности i -й компоненты к общей плотности смеси:

$$\chi_m = \frac{\rho_i}{\rho}. \quad (1.4)$$

Вязкость внутри водяного очистителя рассчитывается с учетом «поправки Энштейна» [39]:

$$\mu = \mu'(1 + 5\chi_0), \quad (1.5)$$

где μ' – динамическая вязкость выхлопных газов при движении без очистки в воде; χ_0 – секундная объемная концентрация выхлопных газов в воде.

Величина вязкости выхлопных газов μ' зависит от их температуры и определяется по формуле Саттерлэнда, в которой константы зависят от типов газов, входящих в состав продуктов горения:

$$\mu' = \frac{\text{const}T^{3/2}}{T + C}, \quad (1.6)$$

а также по приближенной степенной формуле:

$$\frac{\mu'}{\mu_0} = \left[\frac{T}{T_0} \right]^n, \quad (1.7)$$

где n – показатель степени, убывающий с ростом температуры газов (для малых значений температур $n = 1$, а для больших (свыше 150 °C) $n = 0,76$); μ_0 – известное значение вязкости при температуре T_0 ; C – константа Саттерлэнда.

Основные физические характеристики главных компонент выхлопных газов [19, 54] представлены в таблице 1.3.

В работе [83] показано, что вязкость жидкости, в которой происходит всплывание газовых пузырьков, наиболее сильно влияет на те пузырьки, которые имеют малый начальный радиус R_0 . Для относительно больших пузырьков ($R_0 \geq 3$ мм) характер их движения остается практически неизменным. С другой стороны, в работе [47]

Таблица 1.3

Физические характеристики выхлопных газов

| Тип газа: | N ₂ | CO ₂ | O ₂ | H ₂ O | SO ₂ | Сухой воздух |
|--|----------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|--------------|
| Молярная масса M , кг/кмоль | 28,0134 | 44,0098 | 31,9988 | 18,0153 | 64,059 | 28,9627 |
| Стандартная плотность, ρ , кг/м ³ | 1,2504 | 1,9770 | 1,429 | 0,8038 | 2,931 | 1,293 |
| Газовая постоянная, R , Дж/(кг·К) | 296,66 | 187,63 | 259,58 | 461,5 | 126,56 | 287,1 |
| Динамическая вязкость, ν , 10 ⁻⁵ Па·с | 1,667 | 1,37 | 1,926 | 0,922 | 1,17 | 1,724 |
| Константа Саттерлэнда, C | 102 | 270 | 126 | 641 | 462 | - |
| Критическая температура, T_k , К | 126,2 | 304,2 | 154,6 | 647,3 | 430,8 | 132,5 |
| Коэффициент теплоемкости, C_p , Дж/(кг·К) | 1038,7 | 816,5 | 914,8 | 1492 | 1740 | 1004 |
| Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·К) | 0,024 | 0,015 | 0,024 | 0,033 | 0,212 | 0,024 |

отмечено, что масштабный фактор оказывает непосредственное влияние на характер развития зоны турбулентного перемешивания на границе газ-жидкость. Особенно сильно это проявляется на начальной стадии образования и всплывания пузыря, когда происходит изменение его формы с проявлением эффектов гидродинамической неустойчивости, вызванных в основном сдвиговыми течениями и поверхностным натяжением.

По высоте слоя очищающей воды принято различать три характерные области [37, 57, 63], которые характеризуются различными значениями газосодержания:

- 1 зона – зона газовых струй над выпускными отверстиями, в которых величина газосодержания в струе начинает изменяться до значения газосодержания в пузырьковом слое;

- 2 зона – зона газо-водяного пузырькового слоя, которая может рассматриваться, как рабочая область, в которой происходят основные тепло- и массообменные процессы, а величина газосодержания может рассматриваться как стабилизированная;

- 3 зона – зона пенообразования, соответствующая выходу и разрушению пузырьков выхлопных газов из воды с резким увеличением величины газосодержания в движущемся потоке.

При очистке выхлопных газов водой важное значение имеет скорость диффузии i -й компоненты выхлопных газов в воду, а этого с учетом изменения концентрации χ_m только по высоте водяного фильтра (координате z), она, для i -й компоненты выхлопных газов, описывается законом Фика [38-39]:

$$V^* = -\frac{D}{\chi_m^i} \frac{d\chi_m^i}{dz}. \quad (1.8)$$

Входящий в выражение (1.8), коэффициент диффузии в первом приближении принимается постоянным (таблица 1.4) [39].

Таблица 1.4

Значения коэффициента диффузии

| Диффундирующее вещество | $D \cdot 10^{-3}$, см ² /сутки |
|-------------------------|--|
| Воздух | 0,198 |
| Водород | 0,5 |
| Углекислый газ | 0,088 |
| Метан | 0,156 |
| Азот | 0,739 |
| NaCl | 1,11 |
| HCl | 2,12 |
| CuSO ₄ | 0,23 |

Процесс диффузии газа в жидкость всегда сопровождается возникновением на поверхности пузыря выхлопных газов мелких пузырьков. Видеосопровождение развития подобной поверхности представлено на рис. 1.10.

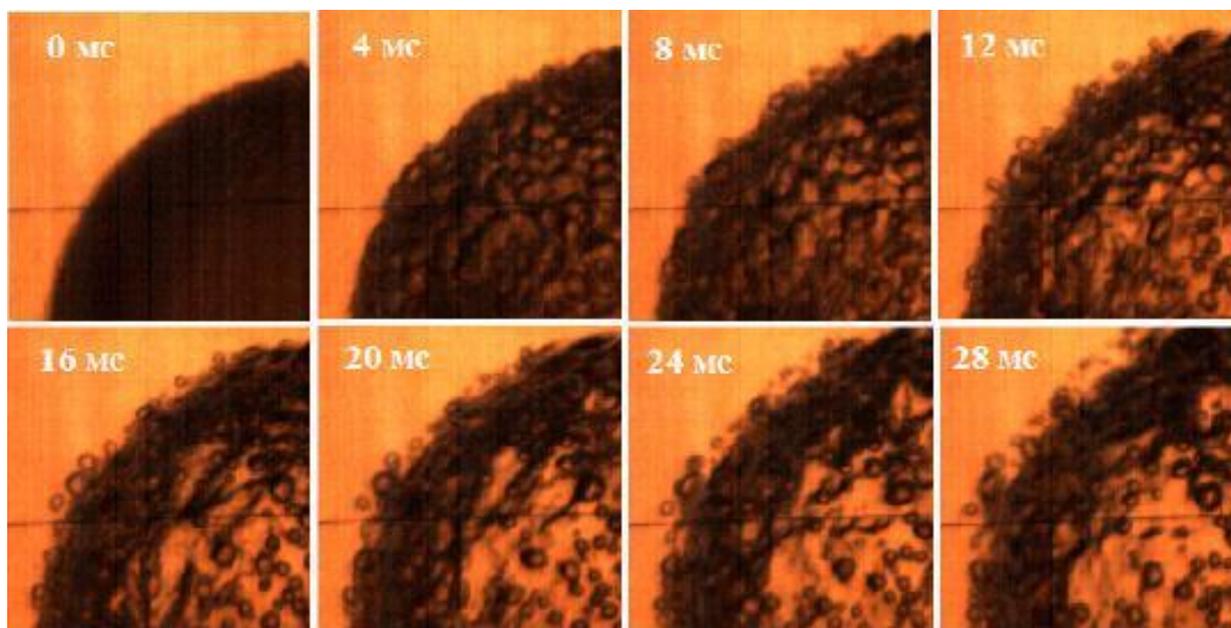


Рис. 1.10. Структура поверхности газового пузырька при подъеме в неподвижной жидкости [45]

Возникновение мелких пузырьков объясняется влиянием мелкомасштабной турбулентности и неустойчивости на границе раздела “дымовой газ-вода” на поверхности основного пузырька при его импульсном ускорении с одновременным увеличением в объеме.

Обработка судовых выхлопных газов неподвижной жидкостью подразумевает их подачу с высокими скоростями истечения. В этом случае, согласно экспериментальным исследованиям [3, 36, 73] над отверстиями, из которых происходит подача газа, образуются струйные потоки. На определенной высоте газовая струя разрушается на ряд отдельных пузырьков. Каждый из них характеризуется своей конфигурацией и размером.

Эффективность всплывания пузырьков выхлопных газов характеризуется параметром эффективного градиента сдвига гидродинамического поля:

$$G = \sqrt{\frac{Vg}{\nu}}, \quad (1.9)$$

где V – скорость всплывания пузырьков выхлопных газов; g – ускорение сил тяжести; ν – кинематическая вязкость жидкости.

В работе [36] показано, что, если пузырьки выхлопных газов распределяются в жидкости равномерно, то коэффициент K_0 , характеризующий их полидисперсность изменяется в пределах $1 \leq K_0 \leq 1,58$. Также установлено, что чем больше рабочая камера фильтрационной установки, а, следовательно, и объем заключенной в ней воды, тем выше будет величина K_0 .

1.5. Факторы, влияющие на скорость очистки выхлопных газов

Скорость очистки выхлопных газов в неподвижной жидкости напрямую зависит от условий движения вверх газовых пузырьков. Основными факторами в этом случае являются: размеры и форма пузырьков, наличие осцилляций их поверхности при подъеме, степень кривизны (спиралевидность) траектории их движения, инерционность жидкости, величина поверхностного натяжения на границе межфазного раздела, основные физические свойства и степень загрязненности жидкости, т.е.

$$V = f(g, d_э, \Delta\rho, \rho_{жс}, \mu_{жс}, \sigma_{г-жс}), \quad (1.10)$$

где $d_э$ – эквивалентный диаметр пузырьков; $\sigma_{г-жс}$ – поверхностное натяжение на границе межфазного раздела газ-жидкость; $\Delta\rho = \rho_{жс} - \rho_г$ – плотность газо-жидкостной смеси.

При фильтрации судовых выхлопных газов величина $\sigma_{г-жс}$ рассматривается, как термодинамический параметр, а именно как мера избытка свободной энергии в поверхностном слое газового пузырька по сравнению со свободной энергией в

объемах двух соприкасающихся фаз. Поскольку при межфазном взаимодействии система “пузырек-вода” всегда стремится к минимуму затрат энергии, то именно поверхностное натяжение заставляет уменьшаться объем пузырька, что в свою очередь, согласно закону Бойля-Мариотта, приводит к возрастанию давления в нем.

Известно [73, 83, 88, 103], что наибольшая концентрация энергии в пузырьках достигается при использовании жидкостей с большой вязкостью, например, глицерин, фосфорная кислота, этиленгликоль, серная кислота и т.п. При этом до начала разрушения пузырька под воздействием внешнего давления условие его устойчивого равновесия в неподвижной жидкости может быть описано уравнением Лапласа-Юнга:

$$P_z = P_{жс} + \frac{2\sigma_{z-жс}}{r}, \quad (1.11)$$

где P_z – внутреннее давление газа; $P_{жс}$ – внешнее давление жидкости; r – радиус пузырька.

Результаты всех перечисленных факторов указывают на необходимость использования их комплексных и комбинированных зависимостей, которые могут быть получены на основании известного из теории подобия метода размерностей. Если в качестве независимых переменных принять величины g , d_3 и $\Delta\rho$, то основные безразмерные критерии, характеризующие процесс очистки выхлопных газов, представляются в виде системы π -чисел:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{V}{g^{\frac{1}{2}} d_3^{\frac{1}{2}}}; \\ \pi_2 &= \frac{\rho_{жс}}{\Delta\rho}; \\ \pi_3 &= \frac{\mu_{жс}}{g^{\frac{1}{2}} \Delta\rho d_3^{\frac{3}{2}}}; \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$\pi_4 = \frac{\sigma_{ж/г}}{g \Delta \rho d_3^2};$$

$$\pi_5 = \frac{\pi_1 \pi_2}{\pi_3} = \frac{\rho_{ж} V d_3}{\mu_{ж}} = Re;$$

$$\pi_6 = \pi_1^2 \pi_2 = \frac{V^2 \rho_{ж}}{g d_3 \Delta \rho}.$$

В том случае, когда силы поверхностного натяжения на границе межфазного раздела “жидкость-газ” являются превалирующими, в приведенной системе (1.12) наибольшее значение принимает четвертый критерий, который после записи в виде π_4^{-1} называют числом Итвоса.

Визуально влияние сил поверхностного натяжения и вязкости жидкости представлено на рис. 1.11. Можно заметить, что при равных условиях подъема в воде и глицерине воздушный пузырек ведет себя по-разному: в воде, вблизи свободной поверхности, произошла деформация, и из сферической он принял практически плоскую форму линзы, а в глицерине его форма осталась неизменной.

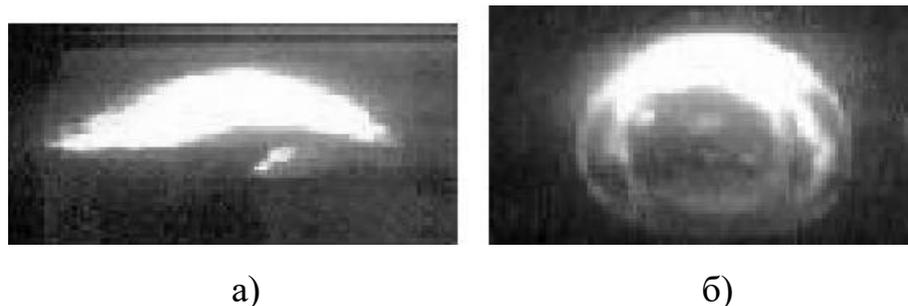


Рис. 1.11. Форма пузырька вблизи свободной поверхности при всплытии [103]:

а – пузырек воздуха в воде;

б – пузырек воздуха в глицерине.

Увеличение скорости очистки выхлопных газов предлагают достигнуть с использованием двух направлений – конструкторского и технологического [103].

Конструкторское направление базируется на использовании оборудования, дающего заведомо низкую концентрацию токсичных составляющих в получаемых продуктах сгорания. Так, например, для подавления NO_x необходимо использовать малотоксичные горелки или реализовывать технологию ступенчатой подачи воздуха и топлива. В случае эксплуатации судов такое направление реализовать достаточно сложно и по этой причине необходимо рассматривать второе направление - технологию фильтрации.

Фильтрацию выхлопных газов в неподвижной воде можно рассматривать как процесс пузырькового кипения. В этом случае происходящий тепло- и массообмен будут характеризоваться наличием дополнительного переноса массы водяного пара в пузырек и теплоты выхлопных газов из пограничного слоя пузырька в объем неподвижной фильтрационной воды.

При подъеме в неподвижной жидкости на газовый пузырек действуют: подъемная сила, сила поверхностного натяжения, сила тяжести и сила лобового сопротивления. Последняя сила является гидродинамической, т.к. она проявляется только при движении массы жидкости вблизи пузырька. По этой причине подъем газового пузырька в воде в зависимости от высоты его расположения может сопровождаться изменением величины его поверхностного натяжения, ростом диффузионного сопротивления, возникновением на границе раздела «газ-вода» межфазной турбулентности, и изменением коэффициента теплоотдачи. Перечисленные факторы также влияют на скорость всплывания и скорость парообразования на поверхности пузырька.

Суммарная сила сопротивления, которую будет испытывать сферический пузырек выхлопных газов, по Л. Д. Ландау [38] оценивается как

$$F_c = 2\pi\rho R^3 g \left[\frac{1}{3} + \frac{3\nu}{R^2} t + \frac{6}{R} \sqrt{\frac{\nu t}{\pi}} \right], \quad (1.13)$$

где ρ и ν – плотность и кинематическая вязкость воды, соответственно; R – радиус пузырька; t – время.

Высота слоя жидкости над поверхностью теплообмена, которая при фильтрации водой выхлопных газов рассматривается, как толщина барботажного слоя, оказывающего влияние на теплоотдачу в системе «вода-газ» (рис. 1.12).

К одному из факторов, оказывающих влияние на скорость фильтрации выхлопных газов в неподвижной воде, можно отнести гидродинамическое сопротивление всплывающего пузырька. Коэффициент сопротивления газового пузырька зависит от числа Рейнольдса, рассчитываемого по скорости его всплывания [96]. Такая зависимость показана на рис. 1.13, из которого видно, что при числах Рейнольдса более 5000 величина C_D выходит на свое автомобильное значение равное $C_D = 4,72$.

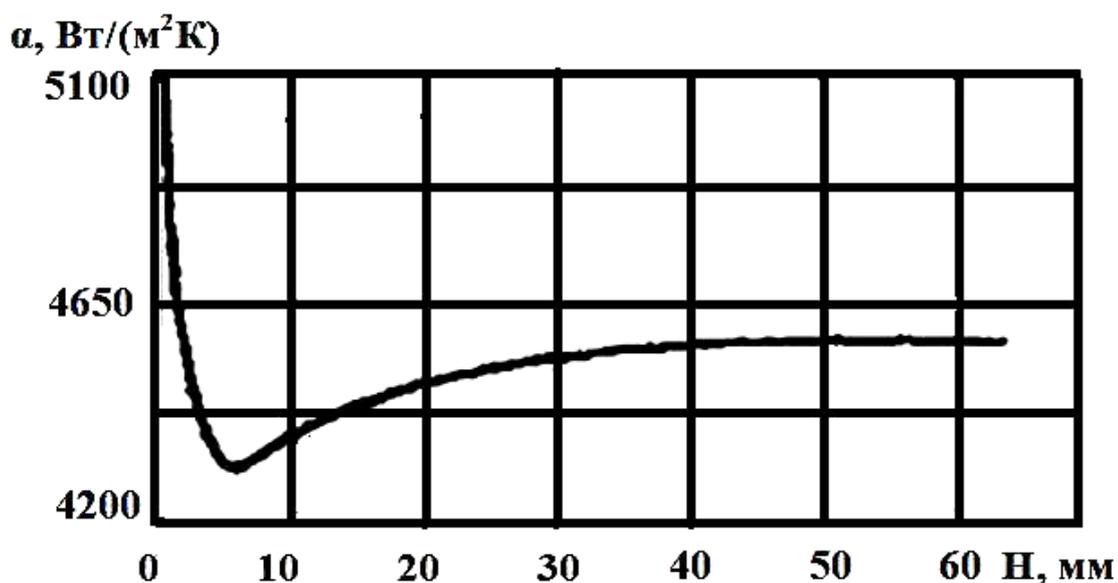


Рис. 1.12. Зависимость коэффициента теплоотдачи от уровня кипящей воды ($q = 40\ 000$ Вт/м²; $p = 10^5$ Па) [65]

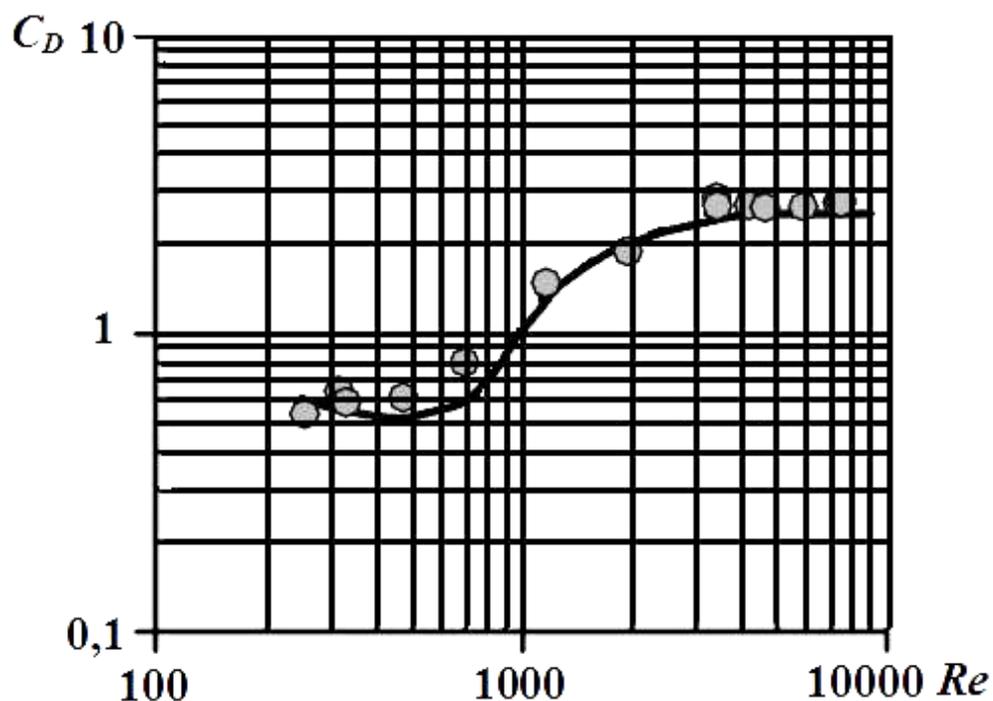


Рис. 1.13. Зависимость величины коэффициента сопротивления всплывающего пузырька C_D от числа Re [97]

1.6. Выводы по разделу 1

Более 90% СЭУ судов мирового флота оборудованы дизельными двигателями, при работе которых на высоковязких сортах топлива с высоким содержанием серы в атмосферу выбрасываются выхлопные газы с недопустимым содержанием вредных веществ.

Правилами 13, 14.1 и 14.4 конвенции МАРПОЛ усилен контроль за выбросом химически опасных соединений: оксидов азота NO_x до 2-х г/кВт·ч и оксидов серы SO_x с твердыми частицами до нуля для судов, построенных после 1 января 2016 года. Суда построенные с 1 января 2000 года по 1 января 2011 год должны выбрасывать NO_x не более 117 г/кВт·ч и SO_x менее 4,5 г/кВт·ч, а с 2011 и до начала 2016 года NO_x менее 7,7 г/кВт·ч, SO_x менее 3,4 г/кВт·ч.

В настоящее время насчитывается до двадцати способов очистки выхлопных газов дизелей, которые разделяют на сухие влажные и электрические. Наиболее

перспективным способом позволяющем полностью удалить компоненты NO_x , SO_x и CO_x из газов, остается каталитический.

Однако этот способ, как и термический, имеет ряд существенных недостатков, особенно то, что требует при очистке высоких температур (750-1200 °С) выхлопных газов.

Рассмотренные тепловые схемы СЭУ и технологические схемы очистки выхлопных газов дизелей позволяют установить расположение и размеры последних в тепловой схеме СЭУ, а также определить начальное и конечное состояние выхлопных газов в фильтрующем устройстве.

Обращает на себя внимание перспективность процесса барботажа воды газовыми пузырьками, однако нелинейность гидродинамических процессов при подъеме пузырьков создает проблему неустойчивости потока выхлопных газов, а также проблемные вопросы абсорбционных качеств удерживаемого слоя воды в газовом потоке, обеспечения его равномерности, особенности функционирования, контроля и управления фильтрующего устройства, что может представлять интерес для дальнейшего исследования.

При подъеме газового пузырька в неподвижной жидкости с равновесным давлением на его поверхности массу выхлопных газов внутри пузырька можно считать пропорциональной величине его начального объема, а плотность аккумулированной в пузырьке энергии, не зависящей от его начального радиуса.

Для выхлопных газов, поднимающихся в воде в виде несферических объемов, вязкость внутри водяной фильтрационной кассеты должна рассчитываться с учетом «поправки Энштейна», а коэффициент диффузии i -й компоненты выхлопных газов в воду в первом приближении можно принимать постоянным.

Аналитическое описание процесса фильтрации выхлопных газов в неподвижной жидкости представлено в виде системы безразмерных критериев. Показано, что если силы поверхностного натяжения на границе межфазного раздела “жидкость-газ” являются преобладающими, то наибольшее значение принимает критерий обратно пропорциональный числу Итваса.

По высоте слоя фильтрационной воды различаются три характерные области с различными значениями газосодержания: зона газовых струй; зона газоводяного пузырькового слоя; зона пенообразования.

Основное содержание раздела 1 изложено в [18, 19, 20].

РАЗДЕЛ 2. ВЫБОР ТЕМЫ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

По заключению М. А. Колегаева и Н. И. Черныша [36] на протяжении более трех десятилетий ведущие дизелестроительные компании мира приступили к практическому решению задач по защите окружающей среды от вредного токсичного воздействия отработавших выхлопных газов дизелей.

В процессе инвестиционной деятельности по модернизации дизелей сначала внимание обращалось на стоимость установки (дизеля), затем на надежность и экономичность ее (его) эксплуатации, то с переходом их работы на высоковязкие (тяжелые) сорта топлива резко повысились требования к экологическим показателям.

Касаясь новых тенденций в экологичности СЭУ, В. И. Истомин [34] отмечает, что в соответствии с Приложением VI к конвенции МАРПОЛ, выброс вредных веществ с выхлопными газами ограничивается, как в специальных районах по контролю за выбросами серы (Sulfur Emission Control Area – SECA), так и в обычных районах мирового океана. Как указывалось в разделе 1, нормы выбросов все время ужесточаются, а количество особых районов контроля растет с каждым годом.

2.1. Выбор темы исследования

Перспективными направлениями сокращения вредных выбросов в атмосферу судовыми дизелями при проектировании и строительстве новых судов считается: изменение вида топлива, включая возобновляемые; сокращение вредных и опасных примесей в выхлопных газах.

В процессе эксплуатации требуется оптимизировать управление грузопотоками, флотом, рейсом и энергоэффективностью СЭУ.

Для уменьшения CO_2 и SO_x в рейсах снижают расход топлива, работая на экономичных скоростях, а на стоянках – подключаются к береговой электросети; используют силиконовые краски для покраски корпусов судов; направляют воздух под днище корпуса; изменяют конфигурацию судна (мостик – на аэрооптикаемом

носу, дымовая труба в корме, грузы между ними), а также СЭУ с двумя винтами или одним азиподом в корме и подруливающим устройством в носу, включая систему регенерации отходящего тракта рабочего тела с турбокомпрессора, работающим в режиме электродвигателя.

Перспективной в повышении экологичности транзитных судов является минимизация энергетических, финансовых и материальных затрат до минимально – неизбежного уровня.

Так как на окисления углеводорода в камере сгорания цилиндра двигателя используется 4-8 % кислорода, то при температуре сгорания топлива (1500 °С и выше) молекулярный азот соединяется с кислородом, образуя NO_x в окружающей атмосфере в виде смога.

В настоящее время имеются два пути уменьшения выбросов NO_x дизелями [36]: в процессе сгорания путем понижения максимального давления сгорания за счет более позднего впрыска топлива, рециркуляции части выхлопных газов, снижения объёмного расхода продувочного воздуха, впрыска воды в камеру сгорания, использования водного эмульгирования топлива. Три из них: эмульгирование и снижение максимального давления сгорания (снижают до 80% NO_x), а также впрыска воды в камеру сгорания (снижают до 50-60% NO_x), наиболее применимы.

Удаление NO_x из выхлопных газов, в основном, осуществляется в каталитических конвертерах методом селективного каталитического снижения (Selective Catalytic Reduction – SCR) путем смешивания выхлопных газов с аммиаком (NH_3) перед пропуском их через специальный катализатор при температуре 300-400 °С, где NO_x преобразуется в молекулярный азот N_2 и воду H_2O , не создавая агрессивные вещества. Методом SCR может быть достигнуто снижение NO_x более чем на 90%. На судах конвертеры (реакторы) с оптимальным удельным размером $4,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кВт}$ снижают содержание NO_x в отработавших газах в 20 раз (с 1200 ppm до 60 ppm) [36].

Очистка (удаление) SO_x и CO_x из выхлопных газов не осуществляется. Сажа периодически удаляется с поверхности выхлопного тракта, кожуха и лопаток газотурбинной установки водой и поверхностно активными веществами (ПАВ), а SO_x удаляют на стадии топливоподготовки [60].

Обзор современных судовых технологических схем по регенерации тепла уходящих выхлопных газов, рассмотренных в предыдущем разделе указывает на их один общий недостаток. Ни одна из схем регенерации в своем технологическом контуре не предусматривает использование системы обработки выбрасываемых в окружающую среду выхлопных газов. При этом можно констатировать, что при эксплуатации судна водного транспорта остаются нерешенными две основные проблемы.

Первая проблема относится к экологическому направлению – судовые выхлопные газы содержат большое количество вредных токсичных составляющих.

Вторая проблема относится к высоким значениям температуры выхлопных газов. Обычно при эксплуатации СЭУ они соответствуют диапазону $t = 180 - 290$ °С, что заведомо снижает энергетический КПД судна, указывает на нерациональность использования топлива и отрицательно сказывается на рентабельности работы судна во время рейса [77].

Актуальность очистки выхлопных газов путем утилизации остаточной тепловой энергии и удалении вредных и опасных примесей вызвана отсутствием универсальных технологических и конструктивных решений для судового дизеля.

Предполагаемая научная новизна заключается в создании способа охлаждения и фильтрации выхлопных газов дизеля, отличающегося максимальной эффективностью и гомохронностью протекания процессов тепломассообмена в системе «охладитель, очиститель – выхлопные газы» и разработки фильтро-охлаждающей установки (ФОУ) рациональных размерений.

Экономическая эффективность диссертационного исследования определяется отношением затрат на теоретические доказательства и экспериментальное их подтверждение, проектирование и изготовление ФОУ, а также её испытание на работающем дизеле к экономии денежных средств от штрафов и ареста судов органами государства порта за несоблюдение конвенционных требований.

Исследование по созданию способа и средства очистки отработавших выхлопных газов дизеля соответствует профилю научной школы кафедры технической эксплуатации флота, Транспортной стратегии Украины до 2020 года (распоряжение

Кабинета Министров Украины №2174-р от 20 октября 2010 г.), Закону Украины “Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 (№ 2818-VI от 21 декабря 2010 г.), паспорту специальности 05.05.03 в направлениях

– теория двигателей и энергоустановок, экспериментальные исследования процессов в них, исследования и расчеты новых схем или типов, теоретические основы их проектирования, согласования с характеристиками объектов назначения и потребителями энергии;

– физическое и математическое моделирование, системный анализ и синтез термодинамических, гидродинамических, газодинамических, электродинамических, электрохимических и других процессов в двигателях, энергоустановках и их элементах;

– методы, технические средства и системы улучшения характеристик двигателей и энергоустановок по экологическим свойствам, в частности показателями шума, вибрации и вредных выбросов,

а также научно-исследовательской работе НУ «ОМА» (НИР «Развитие современной теории и практики технической эксплуатации морского и речного флота: концепции, методы, технологии», ГР № 0114U000346 (2014-2017 гг.)).

Реализуемость диссертационного исследования осуществляется в три этапа: теоретический – 1,5 года; проектирование и подготовка фильтро-охлаждающего узла в судовых условиях – 0,5 года; оформление диссертации и автореферата – 0,5 года. Всего 3,5 года.

С учетом всего отмеченного выше, *тема диссертационной работы* получила название: «Совершенствование процессов охлаждения и фильтрации отработавших выхлопных газов судовой дизельной установки».

Объектом исследования стал процесс выпуска отработавших выхлопных газов судового дизеля.

Предметом исследования процессы фильтрации и охлаждения потока выхлопных газов.

2.2. Цель и задачи исследования

Выбор темы показал, что исследованию подлежат не отдельные элементы системы очистки выхлопных газов судовых дизелей, а вся система в целом, начиная с описания принципов ее функционирования, структурирования и управления, и заканчивая проектированием, конструированием, изготовлением и испытанием.

Поэтому *цель работы* может быть определена как повышение эффективности очистки отработавших выхлопных газов судового дизеля до современных требований.

В основу метода был положен известный физический принцип фильтрации, заключающийся в контактном взаимодействии (барботаже) движущегося потока выхлопных газов, что позволяет поддерживать максимальными коэффициенты теплопередачи при взаимодействии рабочих тел «газ-вода» с неподвижной жидкостью внутри рабочего объема с жесткими и непроницаемыми стенками, что позволит снизить сопротивление теплообмену контактирующих рабочих сред.

Концептуально общий вид разрабатываемой абсорбционной барботажной технологической схемы очистки выхлопных газов (рис. 2.1) отражает принцип ее работы, основанный на использовании воды в качестве рабочего тела [34]. Технологическая схема фильтрации и охлаждения основного потока судовых выхлопных газов, движущегося по судовому дымоходу 1, к элементам фильтрации охлаждения (ФОЭ). ФОЭ подключаются к дымоходу при помощи вспомогательных линий 2, на каждой линии из которых должна быть предусмотрена установка автоматически управляемых невозвратных клапанов 3. Главное предназначение этих клапанов заключается в контроле количества газов, подаваемых на фильтрацию и охлаждение в один из ФОЭ 4. При срабатывании невозвратного клапана 3 предотвращается уход фильтрационной воды из элемента.

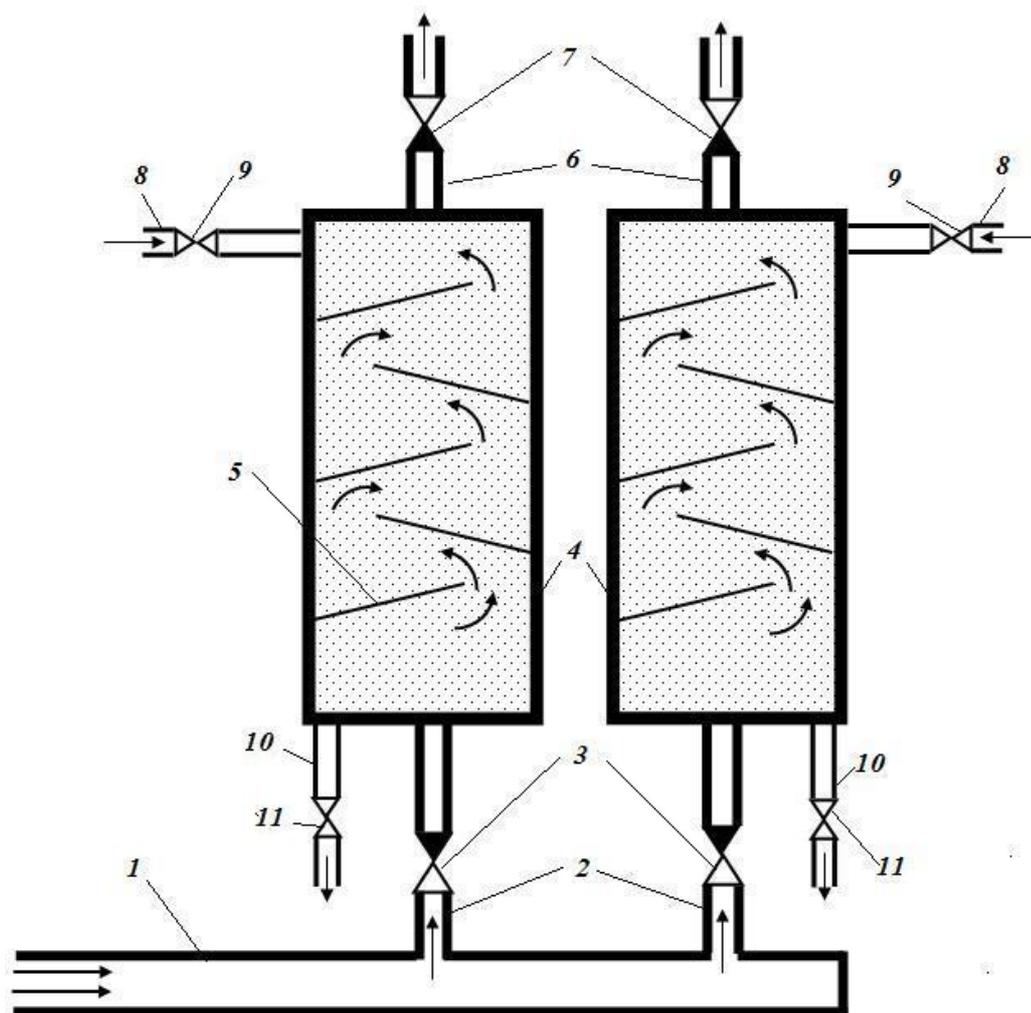


Рис. 2.1. Технологическая схема очистки выхлопных газов:

1 – дымовой тракт; 2 – линия отбора выходящих газов; 3 – невозвратный автоматический клапан; 4 – корпус водяной кассеты ФОЭ; 5 – направляющие пластины; 6 – линия отвода очищенных газов; 7 – невозвратный отводной автоматический клапан; 8 – линия подачи воды; 9, 11 – автоматически управляемые вентили; 10 – линия сброса отработанной воды.

Конструктивно ФОЭ 4 представляет собой вертикальную колонну, внутри которой происходит взаимодействие пузырьков обрабатываемых выхлопных газов с неподвижной водой. Для увеличения времени контактного взаимодействия выхлопных газов с водой внутри ФОЭ предполагается установка направляющих

пластин 5. Угол наклона пластины по отношению к корпусу элемента требует определения.

Подача выхлопных газов осуществляется через раздаточную решетку, которая находится на дне ФОЭ 4. Выхлопные газы, проходя через набор отверстий, попадают в рабочую камеру с фильтрующей водой в виде пузырьков одинаковых размеров. Достоинство такого конструктивного решения подтверждается данными работы [63], согласно которым в момент, предшествующий отрыву пузырька, его вершина уже движется практически со скоростью его стационарного всплытия.

Выхлопные газы за счет обтекания направляющих пластин 5 совершают более продолжительное, по сравнению со случаем пустотелого элемента, сложное вращательное движение, в ходе которого происходит интенсификация тепло-массообменных процессов на поверхности контакта «газ-вода». При реакции основных компонент выхлопных газов – диоксидов азота, серы и углерода в условиях повышенных температур с водой будут образовываться слабоконцентрированные растворы азотной HNO_3 , серной H_2SO_4 и угольной H_2CO_3 кислот. За счет этих химических реакций обеспечивается необходимая очистка выхлопных газов на выходе из ФОЭ с удалением до нормативных требований всех токсичных составляющих (NO_x , SO_x). Характер такого взаимодействия требует отдельного изучения.

В процессе подъема, присутствующие в выхлопных газах механические частицы примесей сажи, предположительно, будут контактировать с водой, а затем осаждаться на поверхности пластин 5. За счет слипаемости частиц будет происходить их укрупнение. Рост массы частиц сажи и наличие конструктивно создаваемых в движущемся потоке застойных вихревых областей приведет к ее скоплению в угловых зонах, образованных корпусом ФОЭ и поверхностью пластин.

По высоте ФОЭ 4 температура и концентрация вредных примесей в выхлопных газах будут уменьшаться, достигая своего минимума на выходе из узла очистки. Полностью очищенные и охлажденные выхлопные газы по линиям отвода б через невозвратные клапаны 7 за счет возможной работы нагнетательного оборудования будут выбрасываться в окружающее пространство.

Поскольку с ростом времени объем, температура и степень чистоты воды в ФОЭ будут непрерывно изменяться в сторону нагрева и ухудшения показателей качества очистки, то следует предусмотреть ее возобновление. Для этого в верхней части ФОЭ предусмотрена установка линии подачи 8 с контролируемым расходом воды вентилем 9. Для сброса воды из ФОЭ предусмотрена линия 10 с вентилем 11.

Для выполнения научно-исследовательских работ по изучению процесса очистки и охлаждения выхлопных газов в судовом главном дизеле были поставлены следующие задачи:

- оценки возможности снижения концентрации примесей в выхлопных газах в ФОЭ в процессе барботажа водой;
- анализа основных факторов, влияющих на скорость фильтрации выхлопных газов в неподвижной жидкости;
- разработки способа контактной очистки выхлопных газов при переменной объемной скорости;
- установления степени влияния геометрических размеров рабочей камеры ФОЭ на рабочие параметры и качество процесса очистки судовых выхлопных газов;
- установление влияния напорно-расходных характеристик системы подачи выхлопных газов на продолжительность и степень их очистки;
- разработки структурной схем системы автоматического управления судового ФОУ;
- создать алгоритм управления судовой ФОУ;
- построить математическую модель движения выхлопных газов внутри ФОЭ в процессе тепло- и массообмена при барботаже;
- установление характеристик рабочих режимов ФОЭ: подъема выхлопных газов в неподвижной жидкости, падения температуры выхлопных газов по высоте активной зоны ФОЭ, изменения величины давления внутри пузырьков выхлопных газов при их всплывании в зависимости от конструктивных исполнений ФОЭ, изменения по высоте рабочей камеры ФОЭ скорости диффузии оксидов азота в воду;

степени влияния скорости подачи выхлопных газов в ФОЭ на величину площади их контактного взаимодействия с водой;

- разработка прототипа ФОУ и создание методики проведения исследований с учетом используемого контрольно-измерительного оборудования;

- экспериментальные исследования оценки эффективности охлаждения газов по высоте ФОЭ в зависимости от скорости подвода выхлопных газов;

- установление взаимосвязи между концентрациями NO_x и SO_x от величины площади контактного взаимодействия газообразной (дымовой) и жидкой (водной) фаз;

- выбор критериев, характеризующих рабочие показатели процесса обработки судовых выхлопных газов;

- разработки технологической схемы изменения производительности ФОУ выхлопных газов;

- выбор материалов и сформировать их перечень для последующего изготовления судового ФОУ выхлопных газов;

- составление перечня основных технологических операций по изготовлению и монтажу судовой ФОУ.

Для реализации поставленных задач необходимо осуществить оценку возможности создания ФОУ выхлопных газов с использованием процессов:

- барботажа газов в неподвижной воде;

- теплообмена при взаимодействии пузырьков газа с водой;

- удаления механических примесей из газа.

Целесообразность очистки выхлопных газов на основе их барботажа в жидкости заключается в возможности одновременного удаления токсичных составляющих и регенерации остаточного и безвозвратно теряемого тепла. В настоящее время предлагаемый метод может рассматриваться, как альтернатива фильтрационным системам, служащим для удаления только отдельных компонент NO_x и SO_x [5, 7, 33 и др.] и стать рабочей гипотезой исследования.

Предлагаемая ФОУ выхлопных газов должна характеризоваться простотой конструкции и обслуживания, а также адаптированностью к установленному на судне оборудованию. Возможность его интегрирования в технологические схемы СЭУ должна повысить как энергетический КПД судна, так и снизить нагрузку на утилизационный котел.

2.3. Специфика взаимодействия движущегося потока газа с неподвижной жидкостью

Для уточнения задач научного исследования следуют более подробно изучить процесс барботажа и характер взаимодействия в системе «газ-вода».

Проблема движения газообразного потока внутри неподвижной жидкости рассматривалась многими исследователями [3, 7, 36-39, 62, 83 и др.]. При этом практически все работы посвящены всплыванию одиночного пузырька, а результаты, которые при этом получаются в последующем, переносятся на барботажный слой.

Единственным условием устойчивого существования пузырька в жидкости является положительное значение разности между давлением газа в пузырьке и суммой всех сил (давления, поверхностного натяжения), действующих со стороны жидкости на его поверхность.

Важное значение имеет критический радиус газового пузырька $r_{кр}$. Пузырек, при $r < r_{кр}$ уменьшается до нулевого объема, а при $r > r_{кр}$ растет в размерах за счет перехода через поверхность раздела паров жидкости во внутренний объем пузырька.

Для оценки основных характеристик движения пузырька газа внутри неподвижной жидкости используется большое число физических и математических моделей. К самым простым относятся базирующиеся на энергетическом балансе такого движения. Результаты, получаемые на их основе, дают качественную оценку характеристик движения пузырька. Так, например, время всплывания газового пузырька t^* на высоту h , соответствующую свободной поверхности, можно найти путем приравнивания работы, совершаемой пузырьком при всплывании к кинетической энергии самого пузырька.

Считая, что z – текущая координата по высоте, $m_{\text{воды}}$ – масса вытесненного пузырьком объема воды, а m_g – масса газа в пузырьке, то согласно теореме об изменении количества движения, можно записать:

$$(F_a - m_g g)(h - z) \approx \frac{m_{\text{воды}} V^2}{2}. \quad (2.1)$$

С учетом того, что для пузырька сферической формы радиусом r масса вытесненного объема воды определяется как $m_{\text{воды}} = \rho_w \frac{4}{3} \pi r^3$, величина скорости подъема на высоту h ($z = 0$) и время подъема пузырька соответственно равны

$$V = \sqrt{2gh \frac{(\rho_w - \rho_g)}{\rho_w}}, \quad (2.2)$$

$$t^* = \frac{h}{V}. \quad (2.3)$$

С учетом того, что плотность выхлопных газов варьируется в незначительном диапазоне $\rho_g = 1-3 \text{ кг/м}^3$ [6, 65] выражение (2.3) можно записать в упрощенном для использования виде:

$$t^* = \frac{h}{4,42\sqrt{h}}. \quad (2.4)$$

Подстановка численных значений дает при высоте столба жидкости равной $h = 2$ м значение скорости подъема $V = 6,2$ м/с и время всплывания $t^* = 0,32$ с.

Отсутствие учета величины гидродинамического сопротивления при выводе выражений (2.2) и (2.3) приводит к значительному искажению результатов. Это

несоответствие реальному процессу всплывания газового пузырька наглядно демонстрируется экспериментальными данными, приведенными на рис. 2.2. На графике показана зависимость скорости подъема пузырька в системе «газ-вода», взятая из работы [97]. Сравнительный анализ приведенных расчетных значений и эксперимента показал их различие по величине скорости более чем в два раза.

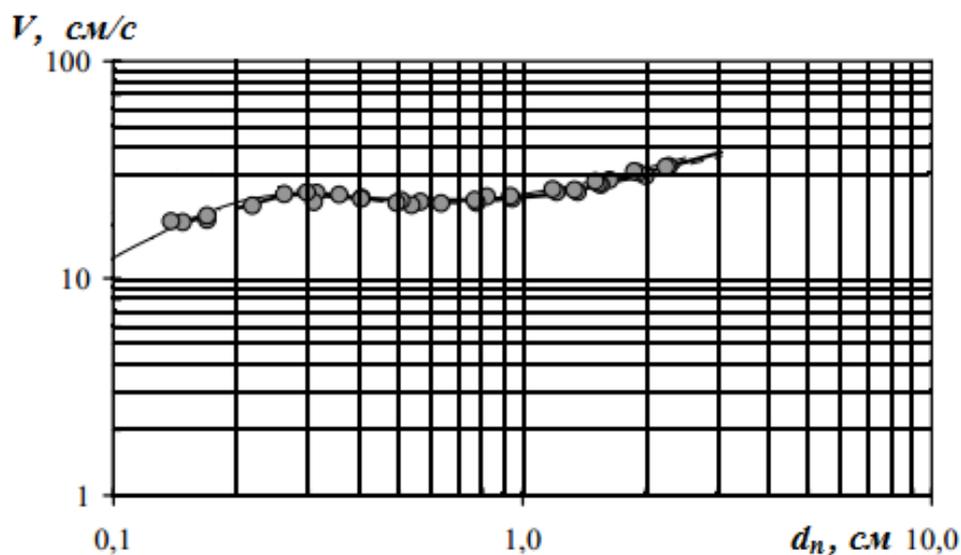


Рис.2.2. Скорость пузырька при подъеме в воде [97]

Учет силы лобового гидродинамического сопротивления пузырька при всплывании производится по выражению:

$$F_c = -C_D S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2.5)$$

где S – площадь миделевого сечения пузырька; C_D – безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления пузырька.

Величины F_c и C_D определяются в зависимости от режима движения пузырька. Если рассматривать движение пузырька выхлопных газов с заранее заданной скоростью движения V_0 , то при малых скоростях его подъема, при числах Рейнольдса $Re \leq 1$, они находятся соответственно по формулам Слезкина [49] и Озена [39]:

$$F_c = 6\pi\mu rV \left(1 + \sqrt{\frac{r^2}{\pi vt}} \right), \quad (2.6)$$

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{3}{16} \text{Re} \right). \quad (2.7)$$

В случае больших чисел Рейнольдса величина коэффициента C_D находится приближенно. Результаты, близкие к экспериментально измеренным значениям, получаемые при расчете C_D в диапазоне чисел Рейнольдса $1 \leq \text{Re} \leq 10000$ можно находить по взятому из работы [9] эмпирическому выражению вида:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} (1 + A_1 \text{Re}^{A_2}) + \frac{A_3 \text{Re}}{A_4 + \text{Re}}. \quad (2.8)$$

Коэффициенты A_1, A_2, A_3, A_4 и входящий в них формпараметр f рассчитываются по следующим эмпирическим зависимостям:

$$f = \frac{s}{S}, \quad (2.9)$$

$$A_1 = \exp(2,33 - 6,46f + 2,45f^2), \quad (2.10)$$

$$A_2 = 0,096 + 0,056f, \quad (2.11)$$

$$A_3 = \exp(4,905 - 13,89f + 18,42f^2 - 10,26f^3), \quad (2.12)$$

$$A_4 = \exp(1,47 - 12,26f + 20,73f^2 + 15,89f^3), \quad (2.13)$$

где s – площадь поверхности сферы, имеющей такой же объем, как и пузырек выхлопного газа; S – фактическая площадь пузырька выхлопного газа.

Если считать, что формпараметр f равен единице, т.е. всплывающий пузырек выхлопного газа имеет сферическую форму, то коэффициенты в выражении (2.8) будут соответственно равны $A_1 = 4,4$, $A_2 = 0,15$, $A_3 = 0,44$, $A_4 = 7185,31$.

Более упрощенные зависимости для определения величины коэффициента сопротивления C_D сферического газового пузырька при его подъеме в жидкости приведены в работе [63]. Для различных диапазонов чисел Рейнольдса они описываются следующим образом:

$$\text{– при } Re < 2: \quad C_D = \frac{24}{Re}; \quad (2.14)$$

$$\text{– при } 2 < Re < 500: \quad C_D = \frac{18,5}{Re^{0,6}}; \quad (2.15)$$

$$\text{– при } 500 < Re < 150000: \quad C_D = 0,44. \quad (2.16)$$

При подъеме пузырька вверх его объем будет уменьшаться при этом интенсивность отвода тепла будет определяться гидродинамическими условиями обтекания его поверхности. Скорость подъема пузырька находится в прямой зависимости от температуры окружающей жидкости, и для различных диаметров пузырька может определяться по эмпирической формуле [97, 103] вида

$$V = k \frac{gd^2 \Delta\rho}{\mu_g}, \quad (2.17)$$

где k – эмпирический коэффициент ($k \geq \frac{1}{18}$); $\Delta\rho$ – разность между плотностями жидкости и выхлопных газов; μ_g – динамическая вязкость воды.

В случае, если используется жидкость с высокой вязкостью, то скорость всплывания пузырька при малых числах Рейнольдса определяется по формуле Стокса [38; 39]:

$$V = \frac{g(\rho_g - \rho_l)R_0^2}{\mu}. \quad (2.18)$$

При всплывании пузырьки выхлопных газов могут увеличиваться в своих размерах за счет диффузии через поверхность пузырька водяного пара. В этом случае обычно допускается [41; 42] что нарастание радиуса пузырька происходит по экспоненциальному закону. Величина начального радиуса ограничивается только сферической устойчивостью пузырька, и в случае высоковязких жидкостей может достигать 1-5 мм [52, 59].

2.4. Технология диссертационного исследования

Исходя из цели исследования, рабочей гипотезой стало предположение о возможности интенсификации процессов одновременного охлаждения и фильтрации выхлопных газов при барботаже в воде на эксплуатационных режимах работы судового дизеля.

Главной задачей диссертационного исследования стало создание принципа работы фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов судового дизеля с последующей разработкой методики построения ее технологической схемы, конструктивных решений и эксплуатации, решение которой требует выполнения трех вспомогательных задач:

– анализа процессов тепломассообмена и сплошности потока пузырьков выхлопных газов барботирующих в слое воды системы «газ-вода»;

– оценки степени влияния геометрических размеров и конструктивных решений фильтро-охлаждающих элементов (ФОЭ) обработки выхлопных газов на интенсивность процессов тепломассообмена;

– разработки конструктивных решений по обеспечению физических условий: равномерности подачи потока газов на выходе из ФОЭ; предотвращению уноса воды газами на выходе из него, а также интенсификации межфазного взаимодействия в системе «газ-вода» при барботаже.

Технология исследования систем обработки выхлопных газов включает этапы системного анализа [2] и представлена в виде технологической карты (рис. 2.3).

Технологическая карта исследования содержит доказательную, подтверждающую и утверждающую компоненты, представленные четырьмя научными результатами и научным положением.

В доказательную компоненту входят как главная, так и три вспомогательные задачи исследования, которые используют системные принципы при решении главной задачи и физикалистский (графоаналитический) подход в процессе решения вспомогательных задач.

Так, при решении первой вспомогательной задачи планируется осуществить анализ свойств, связей и отношений в системе «газ-вода» при барботаже для максимализации поверхности контакта в процессе тепломассообмена и обеспечении сплошности потока газа.

Для решения этой задачи будут использованы известные графоаналитические решения относительно отдельных составляющих процесса тепломассообмена, но в отличие от них требуется установить единовременную (гомохронную) взаимосвязь между движущими силами теплового, массообменного и механического взаимодействия рабочих сред и представленного относительно критериального параметра – радиуса пузырька газа. Это позволит обеспечить устойчивость тепломассообменных процессов в системе «газ-вода» к изменению скорости газов, что в последующем потребует создание математической модели процесса очистки выхлопных газов в зависимости от скорости их прохождения через фильтро-охлаждающий элемент для по-

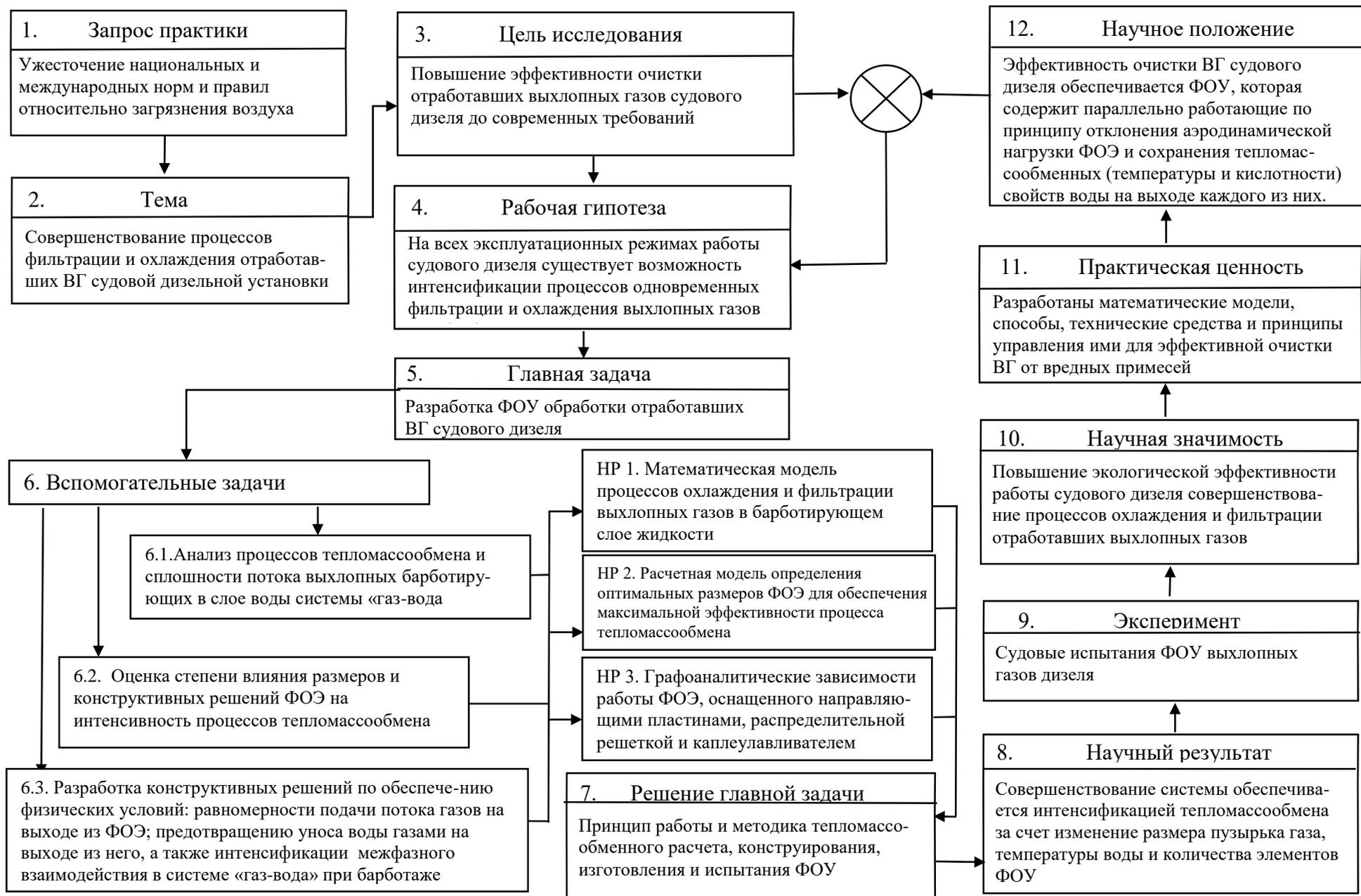


Рис. 2.3. Технологическая карта исследования на тему «Совершенствование процессов фильтрации и охлаждения отработанных выхлопных газов судовой дизельной установки»

следующего ввода ограничений в виде конструктивных характеристик ФОУ.

Решение второй вспомогательной задачи предполагает установление конфигурации ФОЭ, интегрированного в выхлопную систему судового дизеля, с учетом высоты барботажного слоя и сохранением устойчивости тепломассообменных процессов.

Для ее решения требуется применение метода конечных разностей, позволяющего установить распределение движущих сил рабочих тел в процессах теплообмена по высоте барботажного слоя при барботаже в ФОЭ. Полученная математическая модель последовательной (послойной) фильтрации и охлаждения газового потока достаточно легко проверяется экспериментальными методами, которые предусмотрены данным исследованием.

Решение третьей вспомогательной задачи предполагает адаптацию ФОУ к режимам работы судового дизеля, т.е. установление взаимосвязи между показателями очистки выхлопных газов и количеством необходимых фильтрационных кассет ФОУ на переменных режимах работы дизеля.

Доказательство такой взаимосвязи предусматривается методом проведения эксперимента на судовой дизельной установке в процессе эксплуатации судна. Решение третьей вспомогательной задачи определяет принцип управления ФОУ дизеля.

Решение главной задачи, планирующей создание методики тепломассообменного расчета, конструирования, изготовления и испытания ФОУ системы очистки выхлопных газов с использованием графоаналитического, численного методов моделирования и постановки эксперимента.

Результатом решения главной задачи станет созданный принцип работы фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов судового дизеля и разработанная методика построения ее технологической схемы, конструкции и эксплуатации.

2.5. Описание научно-исследовательской установки

Для проведения научно-исследовательских работ в судовых условиях на судне-химовозе “Аму” в период с 01.04.2014 по 01.05.2014 под руководством соискателя была разработана и установлена экспериментальная установка [15, 25], схема которой показана на рис. 2.4.

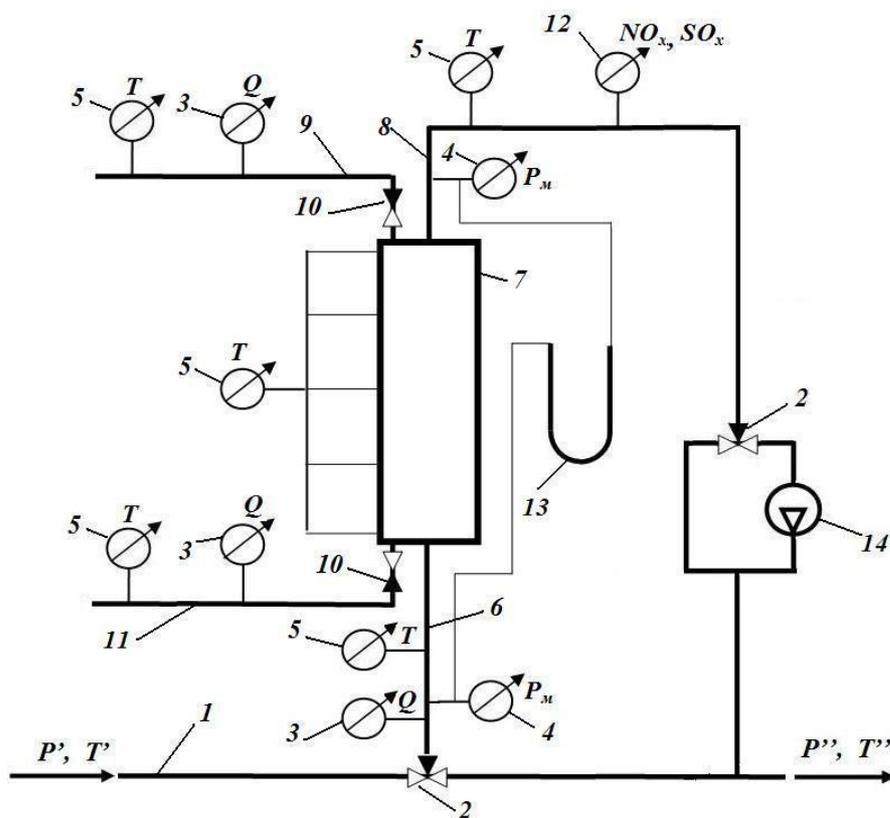


Рис. 2.4. Схема экспериментального стенда ФОЭ дизеля.

Обозначения: 1 – судовой дымоход; 2 – автоматически управляемый трехходовой невозвратный клапан; 3 – расходомер; 4 – манометр; 5 – термометр; 6 – линия подачи выхлопных газов в фильтрационную кассету; 7 – фильтрационная кассета; 8 – линия отвода обработанных выхлопных газов; 9 – линия подачи воды в фильтрационную кассету; 10 – невозвратный клапан; 11 – линия дренажа загрязненной фильтрующей воды; 12 – газоанализатор; 13 – дифференциальный манометр; 14 – вентилятор.

Основной принцип работы ФОУ основан на постоянном автоматическом контроле следующих рабочих параметров:

- температуры выхлопных газов на входе и выходе в установку;
- температуры фильтрующей воды на входе и выходе в установку;
- расхода выхлопных газов, подаваемых на обработку;
- давления выхлопных газов на входе и выходе в установку;
- концентрации примесей NO_x и SO_x .

Работа стенда предусматривает циркуляцию выхлопных газов по замкнутому контуру, используя принцип барботажа в ФОЭ.

Предусмотрена подача выхлопных газов от турбоагрегата на обработку по судовому дымоходу 1. Канал для подвода газов цилиндрической формы диаметром 1,5 м.

Выхлопные газы после газовой турбины поступают в котел-утилизатор.

Избыточное давление, развиваемое турбоагрегатом в зависимости от частоты вращения турбины, составляло:

- $P = 1,7 \cdot 10^5$ Па при $n \in [4,7; 5,0 \text{ с}^{-1}]$;
- $P = 9,9 \cdot 10^5$ Па при $n \in [2,5; 2,8 \text{ с}^{-1}]$;
- $P = 0,4 \cdot 10^5$ Па при $n \in [1,1; 1,7 \text{ с}^{-1}]$.

На линии выхода из судового котла-утилизатора 1 был установлен автоматически управляемый трехходовой невозвратный клапан. При переходе к режиму измерений за счет закрытия основной магистрали и открытия линии отвода, поток выхлопных газов перенаправлялся в сторону ФОЭ.

На линии подачи выхлопных газов 6 в ФОЭ 7 был установлен ряд приборов. Расход выхлопных газов контролировался при помощи ультразвукового расходомера 3, который установлен на входном эжекторном участке ФОЭ. Давление и температура выхлопных газов на входе в ФОЭ измерялись при помощи манометра 4 и термометра 5.

Высота ФОЭ составляла 2,5 м. Падение температуры по высоте элемента контролировалось в пяти створах при помощи термопар, которые являлись составной частью автоматической системы управления.

Начальная и конечная точки измерения температуры газовой смеси находились непосредственно вблизи нижней и верхней стенок рабочей камеры ФОЭ (рис. 2.5). Створы с термопарами располагались на расстоянии 25 мм от стенок (1% высоты рабочей камеры). Расстояние между всеми измерительными створами было одинаковым и составляло 612 мм.

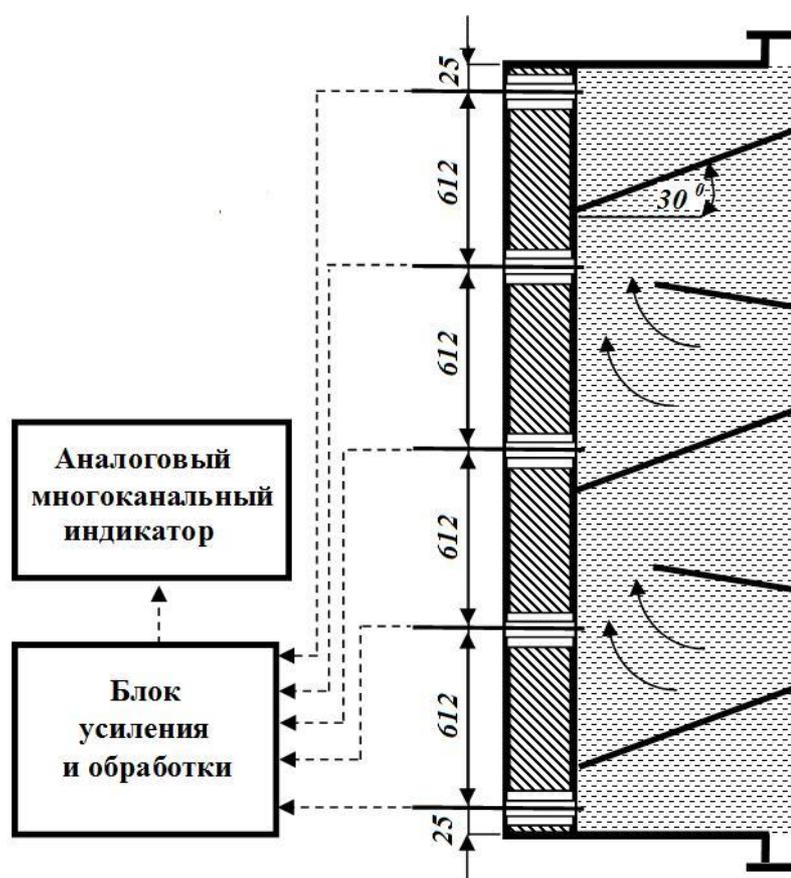


Рис. 2.5. Расположение термопар по высоте ФОЭ

После прохождения ФОЭ 7 обработанные выхлопные газы направлялись в линию отвода 8, где осуществляется контроль трех рабочих параметров: давление измерялось манометром 4; температура – термометром 5, а остаточное содержание примесей (NO_x и SO_x) – газоанализатором 12. Принцип функционирования

последнего основан на сравнении эталонных показателей по составу NO_x и SO_x с действительными. Разность этих показаний выводится на цифровой индикатор и дублируется путем вывода через усилитель сигнала по проводной связи на монитор, расположенный на центральном посту управления СЭУ.

Дополнительный визуальный контроль величины перепада давления выхлопных газов на входе и выходе ФОЭ осуществлен с помощью U-образного дифференциального манометра.

На линии отвода выхлопных газов 8 установлен автоматически управляемый трехходовой клапан 2, который при работе турбоагрегата на высоких и средних нагрузках обеспечивал сплошность потока газов. Для случаев, когда частота вращения турбины была низкой, гидравлические потери на ФОЭ могли стать соизмеримыми или идентичными исходному давлению потока газов, то для отвода обработанных выхлопных газов предусмотрен дополнительный вытяжной вентилятор 14. Клапан 2 автоматически перенаправлял поток газа с линии безнапорного движения на параллельную – напорную линию.

Заполнение ФОЭ водой осуществлено через линию 9, на которой установлен невозвратный клапан 10, обеспечивающий необходимый расход воды и герметизацию линии подачи 9 от проникновения очищаемых выхлопных газов. Расход воды и ее температура контролировались при помощи измерительной диафрагмы 3 и термометра 5. Дренаж загрязненной фильтрационной воды предусмотрен по линии 11.

Общая длина выхлопного тракта экспериментальной установки составляла 12 м. Характерными технологическими участками были: расстояние от котла-утилизатора до ФОЭ – 8 м; расстояние от ФОЭ до среза дымовой трубы – 4 м.

2.6. Характеристики измерительных приборов и анализ погрешностей измерения основных параметров процесса обработки выхлопных газов

Теория эксперимента предусматривает статистическую обработку результатов измерений с оценкой доверительного интервала погрешности измерения [69, 98].

Общая погрешность измерений параметров расхода, давления, температуры и геометрических размеров ФОРУ выхлопных газов определяется с учетом погрешности каждого значения измеряемой величины.

Все геометрические размеры установки: диаметр канала для подвода выхлопных газов, высота дымового хода, угол наклона направляющих пластин внутри ФОРЭ, расстояние между створами термопар, длина выхлопного тракта, расстояние от котла-утилизатора до установки, расстояние от установки до среза дымовой трубы измерялись при помощи лазерного дальномера Leica Disto D8 (Швейцария).

Согласно сертификата индивидуальных стендовых испытаний производителя, абсолютная погрешность измерений используемого лазерного дальномера Leica Disto D8 составляла по: линейному размеру ± 1 мм; углу $\pm 0,1$ град.

Расход выхлопных газов контролировался при помощи ультразвукового расходомера Flowsic 100 (SIC MAИНАК GmbH, Германия). Принцип его работы основан на использовании время-импульсного метода измерения скорости выхлопных газов в дымоходе. Его электронный блок попеременно подавал на пьезоизлучатели ультразвуковой сигнал по потоку выхлопных газов и против него. Разность времени распространения ультразвукового сигнала против потока и по потоку была пропорциональна средней скорости движения выхлопных газов в дымоходе. Величина расхода выхлопных газов определялась по выражению:

$$Q = kS(t'' - t'), \quad (2.19)$$

где k – коэффициент пропорциональности (табулируется для стандартного ряда диаметров условного прохода); S – площадь поперечного сечения дымохода; t'' и t' – время распространения импульса ультразвукового сигнала против и вдоль потока, соответственно.

Расходомер предназначен для работы на диаметрах дымоходов от 1,4 до 13 м при температуре выхлопных газов от -40 °С до 450 °С и скорости их движения от 2 до 40 м/с.

Относительная погрешность измерений расходомера в установленном диапазоне скорости движения выхлопных газов (в пределе допускаемой приведенной погрешности $\pm 0,1$ м/с) согласно данным завода-изготовителя составила $\Delta_Q = \pm 0,5\%$.

Состав выхлопных газов до и после судового ФОЭ контролировался при помощи газоанализатора Dräger MSI Variox-2. Характеристики его заводской настройки позволяют контролировать содержание в выхлопных газах следующих компонент: CO₂, CO, O₂, NO, NO₂, SO₂. При работе судна на стандартизованном дизельном топливе концентрация CO₂ определялась по остаточной концентрации кислорода.

Диапазоны граничных значений измерений для газоанализатора Dräger MSI Variox-2 в соответствии с техническими данными прибора представлены таблицей 2.1.

Таблица 2.1

Диапазоны измерений состава газов газоанализатором Dräger MSI Variox-2

| Измеряемая компонента | Диапазон измерений |
|-----------------------|--------------------------------|
| O ₂ | 0-21 % от объемного содержания |
| CO ₂ | 0-21 % (расчетное) |
| CO | 0 – 4000 ppm |
| CO ⁺ | 0-2 % от объемного содержания |
| NO | 0 – 2000 ppm |
| NO ₂ | 0 – 200 ppm |
| SO ₂ | 0 – 2000 ppm |

За счет программного обеспечения газоанализатора он может использоваться в качестве:

- анализатора состава продуктов сгорания дизельных установок;
- индикатора максимальной эффективности работы дизеля;
- прибора для выборочной проверки источников выброса выхлопных газов;

– составного элемента структурной схемы аварийной сигнализации судовой энергетической установки;

– элемента системы экологического мониторинга судна.

Газоанализатор Dräger MSI Variox-2 был снабжен встроенным мембранным насосом, при помощи которого производился парциальный отбор уходящих выхлопных газов с последующей их подачей в рабочую камеру. В ходе экспериментов состав уходящих выхлопных газов обрабатывался электрохимическим датчиком. Получаемые на нем значения концентрации измеряемых и рассчитываемых компонент выводились в реальном времени на цифровой индикатор.

Для измерения величины давления выхлопных газов на входе и выходе из экспериментального ФОЭ использовались взрывобезопасные цифровые газовые манометры Crystal Engineering 5KPSIXP2I (США). Их относительная погрешность измерений, согласно данным производителя, составляла $\Delta_p = \pm 0,1 \%$.

Температура выхлопных газов во всех каналах определялась при помощи цифрового термометра марки Brigon Flue Gas Thermometer (Великобритания). Он монтировался непосредственно на дымоходе, и глубина его погружения, согласно рекомендациям завода изготовителя, должна составлять от 100 до 400 мм. При экспериментах использовалось максимальное значение – 400 мм. Принцип его действия основан на измерении температурного удлинения встроенных металлических датчиков. Минимальное деление шкалы термометра составляло 10 °С, поэтому погрешность составила ± 5 °С. Согласно паспортным данным его диапазон измерений находится в пределах от 0 °С до 500 °С, а относительная погрешность измерения температуры выхлопных газов равна $\Delta_T = \pm 1\%$.

Изменение температуры смеси воды и выхлопных газов по высоте ФОЭ контролировалось в пяти створах при помощи термоэлектрического преобразователя ТХА Метран-231-4-5 (США). Он предназначен для измерения температуры продуктов сгорания жидкого или газообразного топлива в пульсирующем потоке, движущемся со скоростью до 170 м/с и с давлением до 3 МПа. При замерах скорость изменения температуры измеряемой среды может достигать до 150 °С/мин. Согласно

паспортным данным производителя, предел допускаемых отклонений при измерениях составляет $\pm 1,5$ °С.

Для контроля показаний манометров на входе и выходе в ФОЭ и визуального измерения перепада давлений внутри узла обработки выхлопных газов к его входу и выходу были подключены две линии U-образного дифференциального водяного манометра.

Согласно работе [64] оценка величины погрешности такого манометра должна производиться с учетом того, что:

- погрешность градуировки шкалы равна 0,2-0,4 мм;
- капиллярный эффект дает погрешность от 0,1 мм до 0,2 мм;
- наклон манометра дает погрешность 0,03 % на 1 градус наклона;

При измерениях в соответствии с рекомендациями работ [64, 66] было принято, что значение погрешности с учетом перечисленных параметров по миллиметровой шкале не превышало ± 1 мм.

Расход воды, подаваемой и отбираемой из ФОЭ, контролировался при помощи стандартной камерной измерительной диафрагмы типа ДКС. Она устанавливалась во фланцах трубопровода. К ее основным характеристикам относятся:

- диаметр условного прохода $D_y = 50$ мм;
- диаметр цилиндрической части отверстия $D_{ц} = 1$ мм;
- наружный диаметр $D = 57$ мм;
- условное рабочее давление в трубопроводе $P_y =$ до 2,5 МПа;
- погрешность измерений $\Delta_Q = \pm 1,5$ %.

Во время натурных измерений относительная погрешность измерений при определении числа Рейнольдса обрабатываемого потока была найдена как

$$\Delta_{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{\frac{\Delta_Q}{\Delta_L^2} \Delta_L}{1} = \frac{0,5}{0,1^2} 0,1 = 5\% . \quad (2.20)$$

В таблице 2.2 приведены сводные данные об инструментальной погрешности результатов экспериментальных исследований.

Таблица 2.2

Погрешности измерений рабочих параметров ФОЭ

| Наименование погрешности | Величина погрешности |
|---|--------------------------------|
| Абсолютная погрешность определения линейного размера | $\Delta_L = \pm 1$ мм |
| Абсолютная погрешность определения угла наклона | $\Delta_\alpha = \pm 0,1$ град |
| Относительная погрешность определения расхода | $\Delta_Q = \pm 0,5\%$ |
| Диапазон измерений состава ВГ | См. табл. 2.1 |
| Относительная погрешность измерений давления ВГ | $\Delta_P = \pm 0,1$ % |
| Относительная погрешность измерения температуры ВГ | $\Delta_T = \pm 1\%$ |
| Абсолютная погрешность дифманометра при определении давления по миллиметровой шкале | $\Delta_{Up} = \pm 1$ мм |
| Абсолютная погрешность измерения расхода воды | $\Delta_Q = \pm 1,5$ % |
| Относительная погрешность вычисления числа Re обрабатываемого потока ВГ | $\Delta_{Re} = \pm 5\%$ |

2.7. Выводы по разделу 2

Выбор темы диссертационного исследования осуществлён по результатам анализа экологической эффективности работы судовой СЭУ связанной с минимизацией энергетических, финансовых и материальных затрат до минимально неизбежного уровня.

Рассмотрение способов уменьшения содержания NO_x , SO_x и CO_2 в выхлопных газах дизелей, технологических схем по очистке выхлопных газов определило

основное направление исследования: интенсификация процессов массообмена в элементах фильтрации, снижении температуры выхлопных газов до минимально-неизбежных значений, обеспечение непрерывности фильтрации и охлаждения во всем диапазоне нагрузок на дизель.

Выбор темы осуществлён по факторам актуальности, научной новизны, экономической целесообразности, соответствия тематики паспорту специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки, а также сроком реализуемости. Тема работы направлена на расширение функций ФОУ дизеля, формирование его структуры, принципа и закона управления.

Для достижения цели исследования – повышения эффективности очистки отработавших выхлопных газов судового дизеля до современных требований – выдвинута гипотеза о том, что на всех эксплуатационных режимах работы судового дизеля существует возможность интенсификации процессов одновременных фильтрации и охлаждения выхлопных газов при барботаже в воде.

Технология диссертационного исследования основана на этапах системного подхода: от анализа элементов системы до ее синтеза для обеспечения качества функционирования.

Решение трех вспомогательных задач исследования целесообразно осуществлять графоаналитическим методами: математического моделирования и конструирования (метод конечных разностей), постановки и проведение эксперимента, статистической обработки данных, а также методами теории автоматического управления при решении главной задачи.

Для обеспечения достоверности принимаемых решений создана экспериментальная ФОУ для использования при эксплуатации судового дизеля с приборами контроля и управления, погрешность измерения которых не превышает $\pm 5\%$.

Основное содержание главы 2 изложено в работах автора [12, 15, 19, 20, 23, 25].

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И СПЛОШНОСТИ ПОТОКА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

3.1. Разработка математической модели процессов фильтрации и охлаждения пузырьков выхлопных газов в неподвижной жидкости

Решение первой вспомогательной задачи, связанной с разработкой математической модели процессов теплообмена пузырьков выхлопных газов с неподвижной водой при барботаже в неограниченном объеме, необходимо для прогнозирования характеристик изменения термодинамического состояния газов: температуры, концентрации компонентов газовой смеси и скорости движения.

В большинстве случаев при моделировании процесса движения газов в жидкости используются различные эмпирические уравнения, которые учитывают специфику отдельно взятых условий фильтрации и из-за их ограниченности не могут рассматриваться, как универсальные для моделирования кинетики процессов теплообмена в целом.

Другим подходом является аналитический. Каждый метод и уравнения, которые используются на его основе, должны учитывать тот факт, что изменение количества движения в очищаемом потоке зависит от различных физико-химических свойств и связей между водой и выхлопными газами. К таким связям относятся:

- взаимодействие между силами Архимеда, тяжести, инерции, трения и поверхностного натяжения при всплывании пузырька выхлопных газов в воде;
- тепловое взаимодействие, обусловленное действием сил вязкости, сил давления и теплопереносом от выхлопных газов к воде;
- массообмен при изменении объема пузырька выхлопных газов вследствие протекающих химических реакций взаимодействия основных составляющих выхлопных газов с водой.

Для описания процесса передачи массы от основных компонент выхлопных газов (CO , SO_x , NO_x) в воду используется понятие скорости массопередачи. Она рассчитывается по известному уравнению:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = J_m S (C_n - C), \quad (3.1)$$

где J_m – коэффициент массопередачи водяной пленки; S – суммарная площадь поверхности газовых пузырьков (площадь межфазового контакта); C_n – концентрация газа при полном насыщении воды; C – текущая концентрация растворенного в жидкости газа. Незвестным, как правило, остается коэффициент массопередачи, который должен стремиться к максимуму.

Величину коэффициента массопередачи водяной пленки находят по формуле Хигби [66]:

$$J_m = 2 \sqrt{\frac{DV}{\pi d_n}}, \quad (3.2)$$

где D – средневзвешенное значение коэффициента диффузии основных составляющих выхлопных газов в жидкость; V – скорость всплывания пузырька выхлопных газов; d_n – диаметр пузырька выхлопных газов.

Выражение (3.2) дает возможность моделировать процесс массопередачи при нестационарной молекулярной диффузии, когда водяная пленка, являющаяся одновременно границей раздела «газ-вода» движется вместе с пузырьком. Численными границами области ее применения, соответствующими переходному (от ламинарного к турбулентному) режиму всплывания пузырька являются:

– нижняя граница: $d_n = 0,12 \cdot 10^{-3}$; $V = 0,0082$; $\text{Re} = 1$; коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta = 24$;

– верхняя граница: $d_n = 1,37 \cdot 10^{-3}$; $V = 0,37$; $Re = 500$; коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta = 0,13$.

В случае, когда имеет место турбулентный режим движения пузырьков выхлопных газов в неподвижной жидкости, необходимо использовать формулу Данквертса [7, 66]. Она учитывает взаимодействие поверхности пузырька выхлопных газов с генерируемыми при его всплывании турбулентными вихрями. Именно в ходе такого взаимодействия происходит возникновение мелких поверхностных пузырьков на границе раздела (см. рис. 1.10) и изменение формы основного всплывающего пузырька, а точнее границы раздела двух фаз – газа, заключенного внутри пузырька, и окружающей воды.

Эта формула имеет вид:

$$J_m = \sqrt{D_t R_r}, \quad (3.3)$$

где D_t – коэффициент турбулентной диффузии; R_r – фактор обновления границы раздела фаз.

Величина R_r в силу сложности характера турбулентного движения в аналитическом виде не может быть получена и должна определяться эмпирически по приближенным формулам. Наиболее адекватным подходом для нахождения величины фактора обновления границы раздела фаз можно считать анализ энергетического баланса. Он детально рассмотрен в работе [7].

На основе термодинамического подхода принимается, что процесс обновления поверхности раздела под действием турбулентных вихрей, должен быть связан с затратами энергии на поверхности межфазного раздела. За счет действия сил поверхностного натяжения при обновлении поверхности межфазного взаимодействия между выхлопными газами и водой выполняется работа A . Численное значение новой поверхности раздела, образующейся в единицу времени за счет турбулентного обмена элементов жидкости на единице поверхности с учетом выполненной работы может быть рассчитано, как

$$S' = \frac{A}{\sigma}, \quad (3.4)$$

где A – работа, выполняемая в единицу времени на единице поверхности; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Если в первом приближении считать, что выполняемая работа соизмерима с произведением скорости всплывания газовых пузырьков на потерю давления выхлопных газов по высоте столба жидкости, т.е., что

$$A = V\Delta P = V\zeta \frac{\rho V^2}{2} = \zeta \frac{\rho V^3}{2}, \quad (3.5)$$

то окончательное значение величины S находится в виде

$$S' = \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}. \quad (3.6)$$

Учет фактора формы пузырька позволяет получить уточненное значение величины S по сравнению с (3.6). В этом случае выполняемая работа может быть представлена в виде отношения секундной работы A_ζ , затрачиваемой на преодоление гидродинамического сопротивления к поверхностной энергии пузырька выхлопных газов E_s . Эти две величины находятся как

$$A_\zeta = \frac{F_\zeta \Delta l}{\Delta t} = \frac{F_\zeta V \Delta t}{\Delta t} = F_\zeta V = S_{n.c.} \zeta \frac{\rho V^2}{2} V = S_{n.c.} \zeta \frac{\rho V^3}{2}, \quad (3.7)$$

$$E_s = \sigma S_{n.n.}, \quad (3.8)$$

где F_ζ – сила гидродинамического сопротивления; Δl – вертикальное расстояние, пройденное пузырьком выхлопных газов за время Δt ; $S_{n.c.}$ – площадь поперечного сечения пузырька выхлопных газов; $S_{n.n.}$ – площадь поверхности пузырька выхлопных газов.

С учетом выражений (3.7) и (3.8) выражение для нахождения величины обновления поверхности межфазного взаимодействия в ходе очистки судовых выхлопных газов может быть записано в форме:

$$S' = \frac{A_\zeta}{E_S} = \frac{S_{n.c.}}{S_{n.c.}} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma} = \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}, \quad (3.9)$$

где f_n – формпараметр пузырька выхлопных газов.

Величина f_n косвенным образом позволяет учитывать влияние сил поверхностного натяжения на поверхности межфазного раздела и гидродинамического сопротивления на пузырек при его всплывании.

При использовании уравнения (3.9) уравнение (3.1) может быть переписано в следующем виде:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = A_\zeta \sqrt{D_t \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}} (C_n - C). \quad (3.10)$$

Интегрирование уравнения (3.10) в пределах переменных $0 \leq \delta m \leq \Delta m$ и $0 \leq \delta t \leq \Delta t$, позволяет записать окончательный результат в виде:

$$\Delta m = A_\zeta \sqrt{D_t \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}} (C_n - C) \Delta t, \quad (3.11)$$

где Δm – общая масса составляющих выхлопных газов, растворившаяся в воде за время фильтрации Δt .

Для одиночного пузырька выхлопных газов с площадью поверхности $S_{n.n}$ и объемом $W_{n.n}$ снижение концентрации компонент выхлопных газов возможно рассчитать, как

$$\Delta C = \frac{\Delta m}{W_{n.n.}} = \frac{S_{n.n.}}{W_{n.n.}} \sqrt{D_t \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}} (C_n - C) \Delta t = \frac{1}{\Omega_{n.n.}} \sqrt{D_t \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}} (C_n - C) \Delta t, \quad (3.12)$$

где ΔC – снижение концентрации компонент выхлопных газов, кг/м³; $\Omega_{n.n.} = W_{n.n.}/S_{n.n.}$ – относительный размер пузырька выхлопных газов, м.

Коэффициент фильтрации выхлопных газов, представляющий собой отношение массы составных составляющих выхлопных газов, которые были растворены в воде в ходе фильтрации Δm , к массе m этих же компонент в выхлопных газах, подаваемых на фильтрацию после судового утилизационного котла, может быть вычислен как

$$K_f = \frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta C}{C_{ex}} = \frac{1}{\Omega_{n.n.}} \sqrt{D_t \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}} (C_n - C) \Delta t, \quad (3.13)$$

где C_{ex} – концентрация компонент выхлопных газов на входе в ФОЭ, кг/м³.

Уравнения динамики и баланса энергии выхлопных газов при прохождении через водяной фильтр могут быть получены суммированием идентичных слагаемых уравнений для каждой отдельно взятой компоненты (NO_x , SO_x и т.д.). При этом в последующем можно считать, что все получаемые значения будут являться средними величинами для всех фаз одновременно.

Процесс динамического взаимодействия пузырька выхлопных газов с водой с учетом теплообмена и под действием гидростатического давления может быть описан на основании теоретических результатов работ [41, 42, 56]. При составлении

математической модели было принято, что за все время очистки масса газа внутри пузырька $m(R, t)$ является величиной постоянной, а сама среда на каждом уровне по высоте фильтрационной кассеты представляет собой монодисперсную смесь воды с пузырьками выхлопных газов одинакового размера. Масса пузырька остается постоянной за счет взаимного замещения в равном количестве компонент выхлопных газов парами фильтрационной воды.

Для описания характера изменения давления выхлопных газов в одиночном пузырьке в ходе всплывания в неподвижной жидкости было использовано уравнение вида:

$$P(t) = \frac{R_{\text{вых}}^3 P_{\text{см}}}{3T_{\text{вых}}} \left(\int_{R_{\text{вх}}}^{R_{\text{вых}}} \frac{R_i^2}{T(R_i, t)} dR_i \right)^{-1},$$

где R_i - текущий радиус пузырька (соответствует диапазону $R_{\text{вх}} \leq R_i < R_{\text{вых}}$).

Взаимодействие пузырьков выхлопных газов между собой возможно оценить через дополнительное давление, которое по своему численному значению обычно является невысоким. Согласно теоретическим результатам работы [56] его можно записать в виде:

$$P'(t) = 4\pi\rho_{\text{п}} c^2 B R_{\text{max}}^2 \sqrt{2\rho_{\text{в.г.}} P_{\text{в.г.}}^{\text{max}}}, \quad (3.14)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – концентрация (плотность распределения) пузырьков выхлопных газов в водяном объеме фильтрационной кассеты; c – скорость звука в воде; R_{max} – максимальный радиус пузырька выхлопных газов; $P_{\text{в.г.}}^{\text{max}}$ – давление выхлопных газов в пузырьке; B – числовая константа ($B \in [0,953; 1,1]$).

С учетом уравнения (3.14) двумерное уравнение, взятое из работы [56], для описания теплопроводности выхлопных газов внутри всплывающего пузырька имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{\text{в.г}} c_{\text{п}}} \left[\frac{\partial(\lambda_{\text{в.г}} \text{grad}(T))}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda_{\text{в.г}} \text{grad}(T))}{\partial y} \right] - V_{\text{в.г}} \text{grad}(T) + \frac{1}{\rho_{\text{в.г}} c_{\text{п}}} \frac{dP}{dt}, \quad (3.15)$$

где $\rho_{\text{в.г}} c_{\text{п}} = \frac{P(t)}{T(R_i, t)} \frac{\gamma}{\gamma - 1}$.

Уравнение (3.16) записано с учетом допущения о том, что на межфазной поверхности «пузырек-вода» температура выхлопных газов соответствует равновесной температуре фазовых переходов для оксидов азота и серы.

При разработке математической модели были также использованы теоретические результаты работы [39]. В ней отмечается, что в силу сложности математического описания процессов, связанных с движением газов внутри однородной жидкости, до настоящего времени отсутствуют универсальные уравнения, описывающие такое движение. При этом показано, что для многокомпонентного потока с физической точки зрения наиболее адекватным уравнением движения может быть следующее:

$$\frac{d\rho^i}{dt} + \left(\frac{dV^i}{dx} + \frac{dV^i}{dy} \right) = \rho^i F^i + \left(\frac{\partial P^i}{\partial x} + \frac{\partial P^i}{\partial y} \right) + \sum_j \left[F^{i,j} + J^{i,j} (V^{i,j} - V^i) \right]. \quad (3.16)$$

Основным недостатком уравнения (3.16) при моделировании процесса очистки судовых выхлопных газов является сложность его замыкания. Такие параметры, как интенсивность секундного изменения массы, отнесенной к объему прироста (уменьшения) J или объемная сила F , отвечающая за силовое взаимодействие между компонентами смеси, напрямую определяются химическими реакциями. Они также

зависят от механизмов межфазного обмена массой, количеством движения и энергией между компонентами смеси.

С учетом того, что моделируемый поток судовых выхлопных газов состоит из одной водной компоненты и трех газовых компонент (CO , SO_x , NO_x) в уравнении (3.16) индекс i соответствует водной компоненте. Взаимодействие в ходе процессов массопереноса воды, т.е. i -й компоненты с тремя составляющими выхлопных газов, обозначенных в уравнении индексом j будет описываться слагаемым $J^{i,j}(V^{i,j} - V^i)$ в котором величина $V^{i,j}$ представляет собой скорость массы, претерпевающей переход одной компоненты в другую, т.е. $j \leftrightarrow i$. Численное значение величины J определяется уравнением (1.2).

Главным достоинством уравнения (3.17) является возможность воспроизведения эффекта отличия в скоростях (ускорениях) движения отдельных фазовых составляющих j -х компонент смеси по сравнению со скоростью движения самой смеси. Для большого удобства последующего использования уравнение (3.17) может быть преобразовано к следующему виду [39]:

$$\rho \frac{dV^i}{dt} = \rho F + \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \sum_j \left[\frac{\partial (\rho (V^i - V)(V^j - V))}{\partial x} + \frac{\partial (\rho (V^i - V)(V^j - V))}{\partial y} \right]. \quad (3.17)$$

Последнее слагаемое в уравнении (3.17), как раз и соответствует суммарному переносу количества движения в диффузионных многофазных потоках отдельных фазовых составляющих.

Обобщенную математическую модель процессов тепломассобмена при барботаже выхлопных газов в неподвижной воде с неограниченным объемом запишем, используя уравнения (3.10, 3.15 и 3.17), в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial m}{\partial t} = A_{\zeta} \sqrt{D_t \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}} (C_n - C), \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{в.г} c_{п}} \left[\frac{\partial(\lambda_{в.г} \text{grad}(T))}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda_{в.г} \text{grad}(T))}{\partial y} \right] - V_{в.г} \text{grad}(T) + \frac{1}{\rho_{в.г} c_{п}} \frac{dP}{dt}, \\ \frac{dV^i}{dt} = F + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho} \sum_j \left[\frac{\partial(\rho(V^i - V)(V^j - V))}{\partial x} + \frac{\partial(\rho(V^i - V)(V^j - V))}{\partial y} \right]. \end{array} \right. \quad (3.18)$$

Научным результатом решения первой вспомогательной задачи является математическая модель тепломассообмена отдельных пузырьков выхлопных газов в неподвижной воде на границах их раздела, основные характеристики которой представлены во временной дифференциальной форме, зависящей от диаметра пузырьков, их состава, начального состояния, но без учета ограничений связанных с объемом взаимодействующих рабочих тел и режима их движения в процессе взаимодействия.

3.2. Применение метода конечных разностей для численного моделирования процессов тепломассопереноса и определения геометрических характеристик фильтро-охлаждающего элемента

Решение второй вспомогательной задачи связано с установлением влияния формы ФОЭ на объемные коэффициенты тепломассопередачи, геометрические характеристики которой адаптированы к прогностической математической модели (3.18) и определяют начальные и граничные условия процесса барботажа.

Особенностью решения второй вспомогательной задачи является выбор метода решения дифференциальных уравнений в частных производных относительно пространственных координат и времени с возможностью последующей его экспериментальной проверки в ходе определения геометрических размерений фильтро-охлаждающего узла.

Как видно из приведенных выше уравнений математической модели все они составлены для двумерного течения в вертикальной плоскости фильтрующего элемента. Это сделано на основании следующих предпосылок:

- рабочая камера ФОЭ представляет собой призму с квадратным основанием и восходящие линии тока в ее каждой расчетной вертикальной плоскости могут приниматься в первом приближении, как полностью идентичные друг другу;

- вихревые образования, которые возникают в угловых зонах, образованных основанием направляющих пластин и корпусом, а также на краях направляющих пластин внутри рабочей камеры в силу невысоких скоростей движения исчезают при взаимодействии между собой пузырьков выхлопных газов. При разрушении вихрей диссипация энергии в окружающую жидкость не оказывает никакого влияния на процесс тепло- или массопереноса.

Для проведения расчетов на основании записанных выше уравнений необходимо задавать начальные и граничные условия.

Наиболее рациональным способом задания граничных условий является равенство нулю всех составляющих скорости на твердых поверхностях моделируемого объема. Для каждого расчетного временного слоя такое условие герметичности жестких поверхностей расчетного объема записывается в следующем виде:

$$V = V_x = V_y = 0. \quad (3.19)$$

Самое нижнее сечение расчетного объема, соответствующее индексу $j = 0$ также должно рассматриваться, как входная граница. В этом сечении во всех расчетных узлах при численном моделировании необходимо задавать следующие условия для входных динамических характеристик потока:

- температура в каждой расчетной точке ($i = 0..N$) численно равна значению входной температуры выхлопных газов:

$$T = T_{ex}; \quad (3.20)$$

– поперечная составляющая скорости отсутствует, а полная скорость определяется вертикальной составляющей, равной скорости подачи выхлопных газов в фильтрационную колонну:

$$V = V_y = V_{ex}, \quad (3.21)$$

$$V_x = 0; \quad (3.22)$$

– давление в первом сечении определяется суммой динамического давления выхлопных газов на входе в расчетный объем и статического давления создаваемого высотой столба фильтрующей воды:

$$P = P_{ex} + P_{cm} = \frac{\rho V^2}{2} + \rho g H; \quad (3.23)$$

– концентрация и масса выхлопных газов определяется их исходным составом на входе в расчетный объем:

$$C_{NOx} = C_{NOx}^{ex}, \quad (3.24)$$

$$C_{SOx} = C_{SOx}^{ex}, \quad (3.25)$$

$$M_{г.з.} = M_{NOx}^{ex} + M_{SOx}^{ex}; \quad (3.26)$$

– диаметр пузырьков выхлопных газов в первых трех расчетных сечениях ($j < 4$) равен диаметру выхлопных отверстий раздаточной решетки:

$$d_{\text{в.з.}} = d_p. \quad (3.27)$$

Начальные условия для проведения последующих численных расчетов необходимо задавать по всей расчетной области на первых двух временных уровнях. В этом случае считается, что в начальный момент времени внутри расчетного объема находится только неподвижная фильтрующая вода и скорость во всех ее точках равна нулю, а давление (за исключением первого сечения, см. (3.23)) описывается только основным законом гидростатики:

$$V = V_x = V_y = 0, \quad (3.28)$$

$$P = P_{cm} = \rho g H. \quad (3.29)$$

Температура по всему расчетному объему задается одинаковой и равной начальной температуре фильтрационной воды:

$$T = T_{\text{в.}} \quad (3.30)$$

Концентрация и масса выхлопных газов во всех точках расчетного объема, за исключением сечения $j = 0$, задаются нулевыми:

$$C_{\text{NOx}} = 0, \quad (3.31)$$

$$C_{\text{SOx}} = 0, \quad (3.32)$$

$$M_{\text{в.з.}} = 0. \quad (3.33)$$

Поскольку при моделировании процесса очистки судовых выхлопных газов рассматривается газо-воздушная смесь, то ее динамическая вязкость должна быть намного меньше чем у воды. При задании начальных условий в ходе численных экспериментов она принималась равной $\mu = 10^{-3}$ Па·с.

Для математического моделирования системы дифференциальных уравнений использован численный метод конечных разностей. В соответствии с теорией подобия при соблюдении геометрического, кинематического и динамического масштабных коэффициентов и соблюдения равенства критериев подобия, которые были ранее сформулированы в виде системы (1.12), полученные результаты для модели и натурального объекта можно считать идентичными [3, 30].

Конечно-разностная схема была составлена для развития приведенной в предыдущем подразделе математической модели с использованием расчетной сетки, показанной на рис. 3.1(а), для возможности ее использования при движении пузырьков газа по высоте ФОЭ.

В ходе математического моделирования число направляющих пластин внутри рабочей камеры ФОЭ было принято равным их числу в натурном объекте и при проведении расчетов соответствовало пяти единицам. Поскольку рабочая камера ФОЭ представляет собой призму с квадратным основанием, то было принято допущение об отсутствии градиентов скорости (боковых течений) в поперечном направлении. Считалось, что поскольку основное движение потока происходит только в вертикальном и поперечном направлениях, то трехмерные эффекты пространственного течения внутри рабочей камеры на результаты расчетов не оказывают никакого влияния. По этой причине все численные эксперименты проводятся в плоской (двумерной) постановке.

Начало координат (точка отсчета сечений, на которых располагаются расчетные узлы) расчетной сетки (рис. 3.1(а)) находилось в нижнем левом углу рабочей камеры. В направлении оси OX число расчетных сечений составляло $i_N = 2500$, а в вертикальном направлении вдоль оси OY соответственно $j_M = 25000$. Соответствующим образом, число расчетных узлов, которые при дискретизации за-

меняли все рабочее пространство камеры ФОЭ, составляло $i_N \cdot j_M = 62500000$ единиц.

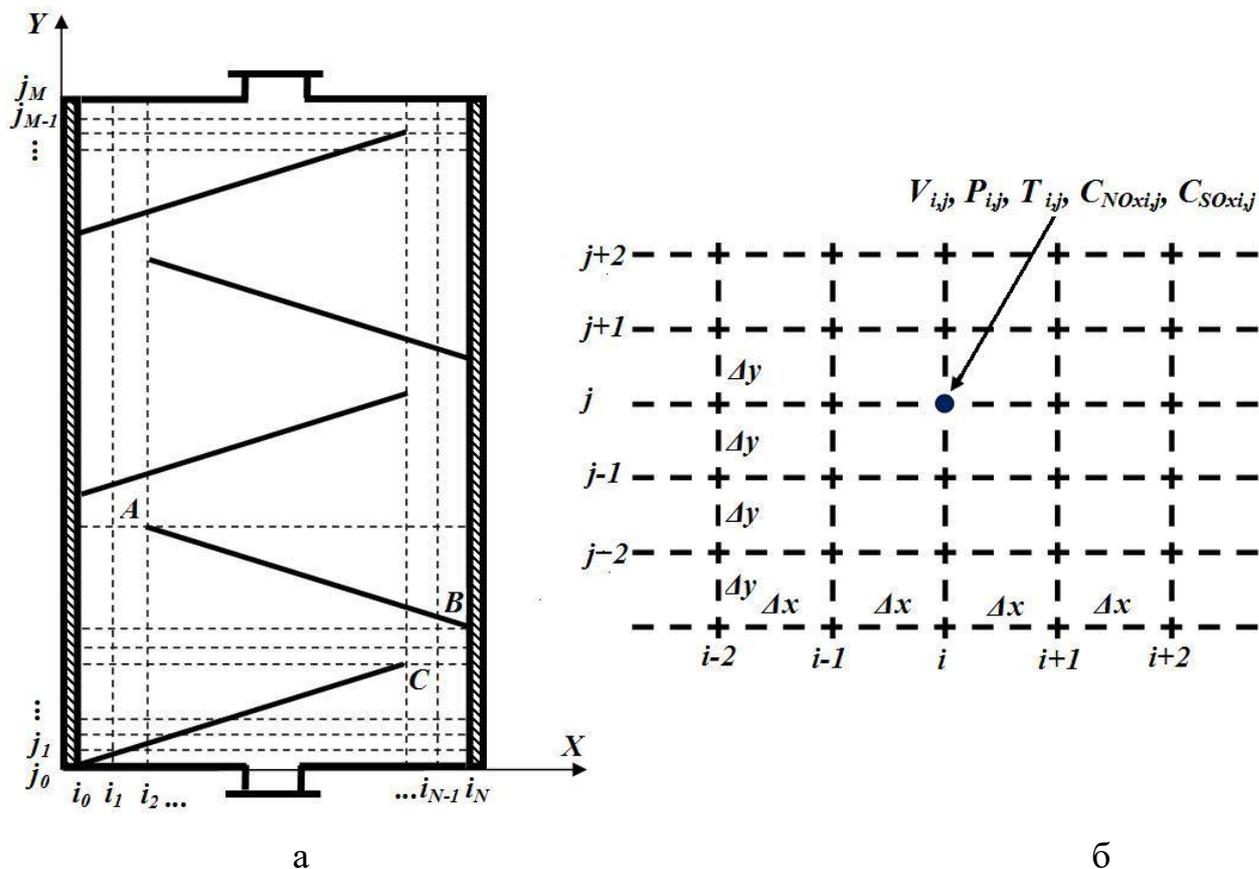


Рис. 3.1. Расчетная сетка:

а – расчетный объем;

б – выделенная область расчетной сетки

Шаг сетки в обоих направлениях выбирается таким образом, чтобы точки, соответствующие началу и окончанию направляющих пластин внутри рабочей камеры, имели четкие и однозначные координаты по i -му и j -му индексу расчетной сетки. В качестве примера на рис. 3.1 (а) эти точки обозначены, как A , B и C .

Все численные эксперименты производятся в размерной форме. Поскольку моделируемые процессы тепло- и массообмена в большей степени зависят от поперечного направления, то очень важным было качественно воспроизводить изменение всех параметров от одного горизонтального слоя к другому. По этой причине шаг сетки вдоль оси OX (см. рис. 3.1 (б)) принимался большим по сравнению

с шагом в вертикальном направлении OY . В этих направлениях они имели фиксированные значения и, соответственно, составляли: $\Delta x = x_i - x_{i-1} = 0,0004$ мм, $\Delta y = y_j - y_{j-1} = 0,00008$ мм.

Приведенная на рис. 3.1 (б) расчетная сетка используется для выполнения нестационарных расчетов. В каждой узловой точке на текущем и неизвестном расчетном временном слое определялись: скорость, давление, температура и концентрации составляющих компонент судовых выхлопных газов $V_{i,j}$, $P_{i,j}$, $T_{i,j}$, $C_{NOxi,j}$, $C_{SOxi,j}$.

Каждая производная, входящая в исходные уравнения математической модели, была записана в конечно-разностном представлении. В зависимости от расположения на сетке расчетного узла все слагаемые дискретизировались при помощи левосторонних, центральных и правосторонних конечных разностей. В качестве примера для первой производной скорости вдоль оси OX эти формулы перехода от сплошного расчетного объема к дискретному показаны в таблице 3.1. В ней записаны формулы для дискретизации нелинейного (ответственного за изменение качественных характеристик процесса обработки выхлопных газов) и нестационарного (ответственного за изменение пространственно-временных значений определяемого параметра) слагаемых.

В таблице 3.1 первые три формулы дискретизации можно получить путем раскладывания соответствующего слагаемого в ряд Тейлора с отбрасыванием остаточных членов. Все приведенные конечно-разностные формулы имеют второй порядок точности по пространству и времени [1, 54].

При дискретизации всех уравнений математической модели используется явная аппроксимация. В случае ее применения все неизвестные слагаемые (скорость, давление, температура и т.д.) на новом временном уровне всегда рассчитывались только на основании уже известных с предыдущих временных слоев. Именно по этой причине описанные начальные условия задаются для первых двух временных уровней. Шаг по времени составил $\Delta t = 0,001$ с.

Таблица 3.1

Формулы дискретизации производных первого порядка

| Наименование слагаемого | Математическое выражение |
|--------------------------|--|
| Левосторонние разности | $\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{3V_{i,j}^{n-1} - 4V_{i-1,j}^{n-1} + V_{i-2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$ |
| Правосторонние разности | $\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{-3V_{i,j}^{n-1} + 4V_{i+1,j}^{n-1} - V_{i+2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$ |
| Центральные разности | $\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{V_{i+1,j}^{n-1} - V_{i-1,j}^{n-1}}{2\Delta x}$ |
| Нелинейное слагаемое | $V \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{2} (3V_{i,j}^n - V_{i,j}^{n-1}) \frac{\partial V}{\partial x}$ |
| Нестационарное слагаемое | $\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} V_{i,j}^{n+1} - 2V_{i,j}^n + \frac{1}{2} V_{i,j}^{n-1} \right)$ |

Таким образом, на основании всех изложенных выше допущений и формул основные уравнения математической модели представлены в линеаризированном дискретном виде, для адаптации которой в модель (3.18) осуществить следующие операции

Уравнение (3.14) с учетом предыдущего запишется как:

$$P_{i,j}^{n+1} = \frac{R_{\text{вблх}}^3 \rho g \Delta y}{3T_{\text{вблх}}} \sum_{R_{\text{вх}}}^{R_{\text{вблх}}} \left(\frac{R_{i,j}^2}{T_{i,j}} \Delta y \right)^{-1} + 4\pi \rho_{\text{п}} c^2 B R_{\text{max}}^2 \sqrt{2\rho_{\text{в.г.}} P_{\text{в.г.}}^{\text{max}}}. \quad (3.34)$$

Уравнение (3.17) – в трех вариантах дискретизации по оси Ox :

– левосторонние разности

$$V_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{3} \left[4V_{i,j}^n - V_{i,j}^{n-1} + 2\Delta t g + \frac{\Delta t}{\rho} \left[\left(\frac{3P_{i,j}^n - 4P_{i-1,j}^n + P_{i-2,j}^n}{\Delta x} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j-1}^n}{\Delta y} \right) - \left(\frac{(V_{i,j}^n - V_{i,jNOx}^n)(V_{i,j}^n - V_{i,jSOx}^n)}{\Delta x} + \frac{(V_{i,j}^n - V_{i,jNOx}^n)(V_{i,j}^n - V_{i,jSOx}^n)}{\Delta y} \right) \right] \right]; \quad (3.35)$$

– центральные разности:

$$V_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{3} \left[4V_{i,j}^n - V_{i,j}^{n-1} + 2\Delta t g + \Delta t \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{P_{i+1,j}^n - P_{i-1,j}^n}{\Delta x} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j-1}^n}{\Delta y} \right) - \left(\frac{(V_{i,j}^n - V_{i,jNOx}^n)(V_{i,j}^n - V_{i,jSOx}^n)}{\Delta x} + \frac{(V_{i,j}^n - V_{i,jNOx}^n)(V_{i,j}^n - V_{i,jSOx}^n)}{\Delta y} \right) \right] \right]; \quad (3.36)$$

– правосторонние разности:

$$V_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{3} \left[4V_{i,j}^n - V_{i,j}^{n-1} + 2\Delta t g + \frac{\Delta t}{\rho} \left[\left(\frac{-3P_{i,j}^n + 4P_{i+1,j}^n - P_{i+2,j}^n}{\Delta x} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j-1}^n}{\Delta y} \right) - \left(\frac{(V_{i,j}^n - V_{i,jNOx}^n)(V_{i,j}^n - V_{i,jSOx}^n)}{\Delta x} + \frac{(V_{i,j}^n - V_{i,jNOx}^n)(V_{i,j}^n - V_{i,jSOx}^n)}{\Delta y} \right) \right] \right]. \quad (3.37)$$

В приведенных выше уравнениях неизвестным остается временной уровень, для которого производится расчет параметров потока, который обозначен как $n+1$.

При проведении расчетов подстановка разностных формул в общее уравнение производится в зависимости от расположения расчетного узла. Так, для первого и последнего расчетных сечений используется по направлению OX – односторонние разности, а в направлении OY центральные разности, исключая первый и последний расчетный узел. В этих узлах также использовалась однонаправленная аппроксима-

ция дифференциальных операторов. Как видно в уравнениях (3.35) и (3.37)

разностные аналоги слагаемых $\frac{\partial P}{\partial x}$ и $\frac{\partial P}{\partial y}$ по форме записи отличаются друг от друга.

3.3. Разработка рекомендаций по проведению натурных исследований процессов очистки выхлопных газов в судовых условиях

Решение третьей вспомогательной задачи необходимо для совершенствования методики проведения натурных исследований в условиях судна по определению геометрических характеристик и конструктивных особенностей ФОЭ по обеспечению равномерности протекания процессов фильтрации и охлаждения газа.

Основными требованиями к формированию рекомендаций являются: обеспечение возможности изменения диаметра пузырьков газа в поперечном сечении ФОЭ; изменения времени контакта рабочих сред; снижения уноса абсорбента с выхлопными газами; послыйного контроля состояния барботирующей среды. Поэтому в ее основу положены условия геометрического и физического подобия и критериальной идеальности, особенно по критерию изохронности Ньютона.

Ввод экспериментального фильтро-охлаждающего узла (ФОУ), состоящего из трех параллельно соединенных ФОЭ различных объемов, в рабочий процесс очистки выхлопных газов дизеля должен производиться одновременно с началом работы СЭУ. В таком случае обеспечивается полное соответствие получаемых результатов измерений рабочим характеристикам обрабатываемого потока выхлопных газов.

Нахождение размерений фильтрующих элементов проводится с использованием трех вариантов габаритных размеров ФОЭ.

Условия проведения эксперимента на каждом ФОЭ должны быть полностью идентичными (рис. 3.2). Для этого необходимо во время каждого эксперимента с интервалом от 5 до 10 минут при помощи соответствующих невозвратных клапанов поочередно подключать ФОЭ с разными габаритами к линии очистки выхлопных газов.

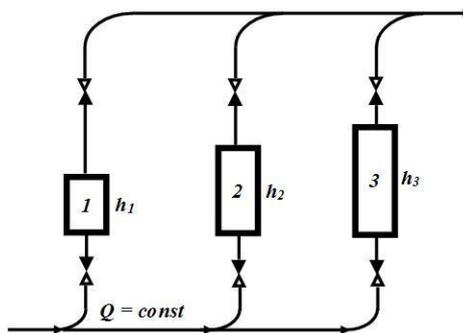


Рис. 3.2. Схема расположения ФОЭ в экспериментальном варианте ФОУ

Это позволит найти оптимальное соотношение размеров ФОЭ и их количества в ФОУ. При этом максимальное количество ФОЭ не должно превышать четырех из соображений компоновки СЭУ.

При определении габаритов и/или числа рабочих элементов все измерения производятся в режиме ручного управления. При закипании, мгновенном загрязнении или выносе в дымоход фильтрующей воды необходимо переключать поток на элемент с наибольшими габаритными размерами или включить в работу все элементы одновременно.

До начала производства замеров необходимо при помощи газоанализатора проверить соответствие величины входной концентрации NO_x и SO_x в газе известным данным для соответствующего вида топлива. В случае сильного расхождения этих показаний (более 20 %) измерения не проводятся.

Эффективность процессов фильтрации и охлаждения выхлопных газов определяется по величине поверхности контакта газовой и водной составляющей внутри фильтрующего элемента. С целью ее изменения необходимо конструктивным способом обеспечивать генерацию в нижней части ФОЭ газовых пузырьков различного диаметра, выбрать и установить угол наклона направляющих пластин внутри ФОЭ таким образом, чтобы обеспечить максимально долгий контакт выхлопных газов с водой.

Послойное измерение температуры смеси по высоте ФОЭ следует выполнять после стабилизации режима работы СЭУ. С целью снижения разброса получаемых данных замеры должны выполняться не менее восьми в каждом створе ФОЭ (см. рис. 2.5) с последующим их осреднением.

Определение оптимальной скорости подачи выхлопных газов в ФОУ и измерение градиента падения температуры в ФОЭ следует определять путем вариации скорости подачи газов.

Измерение градиента падения концентрации NO_x и SO_x в зависимости от площади контактного взаимодействия фаз «газ-вода» выполняется изменением диаметра пузырьков выхлопных газов во входном сечении ФОЭ. Изменение размера пузырьков происходит за счет использования двух вариантов плоских раздаточных коллекторов. На их поверхности равномерно и симметрично располагаются отверстия одинаковых диаметров. Габаритные размеры каждого раздаточного коллектора должны соответствовать внутренним размерам фильтрующего элемента, а диаметр отверстий в первом случае должен составлять 6 мм, а во втором 10 мм.

Заполнение элемента фильтрующей водой должно осуществляться до уровня $0,85H$, где H – высота его рабочей камеры ФОЭ, снятая по внутреннему размеру. Незаполненный объем камеры обеспечит наличие пространства для пенного мелкодисперсного пузырькового слоя, который неизбежно будет образовываться при выходе выхлопных газов из воды.

Часть воды будет уноситься выхлопными газами, поэтому для задержки капель воды необходимо в верхней части фильтрующей камеры устанавливать каплеотбойники (рис. 3.3).

При наличии двух решеток, содержащих однонаправленные параллельные каналы, влага будет конденсироваться на поверхности пластин, и при укрупнении капель за счет сил гравитации они будут стекать обратно в воду. Часть влаги, которая будет уноситься выхлопными газами, попадет в каналы второй решетки, имея иное направление потока по сравнению с первой решеткой с поворотом на 90° . Это приведет к дополнительной турбулизации газа и конденсации мелких капель воды на

поверхности направляющей решетки, вызывая дополнительное аэродинамическое сопротивление газу.

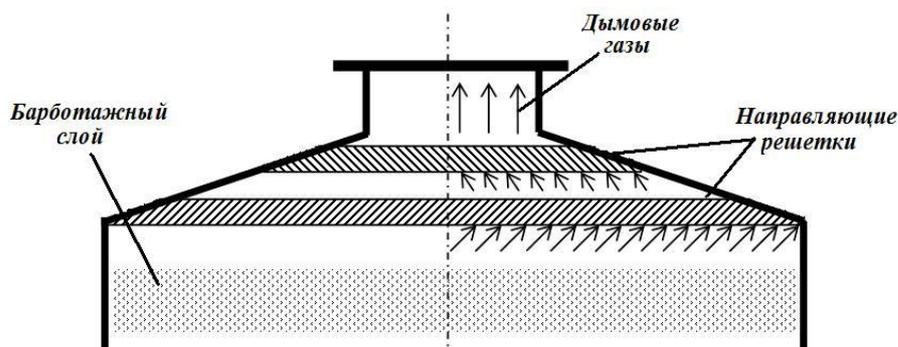


Рис. 3.3. Расположение решеток для улавливания капель воды.

Научная новизна разработанных рекомендаций заключается в создании физических условий влияния на геометрические и термодинамические характеристики процесса барботажа в ФОЭ для установления эффективных режимов работы ФОУ в составе СЭУ, варьируя поверхностью контакта рабочих сред в виде размеров пузырьков, временем контакта и аэрогидродинамическим режимом движения.

3.4. Выводы по разделу 3

В результате решения первой вспомогательной задачи установлены термодинамические характеристики протекания процесса барботажа в системе «газ-вода» и конструктивные характеристики средств обеспечения условий его протекания в ФОЭ для:

- прогноза протекания процесса барботажа газа в неподвижной жидкости и неограниченном объеме в виде математической модели (3.18), устанавливающей законы изменения температуры, массы и скорости движения газовой составляющей в вертикальной плоскости сечения ФОЭ и представленных в виде системы трех нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных;

– адаптации математической модели процесса барботажа (3.18) к моделям конструирования ФОЭ путем численной линеаризации осуществленной методом конечных разностей дифференциальных уравнений первого порядка;

– установки ограничений на диапазоны изменения термодинамических параметров и условий протекания процесса с помощью конструктивных особенностей ФОЭ представленных в виде рекомендаций.

Основное содержание главы 3 изложено в следующих работах автора [13-15, 21-25].

РАЗДЕЛ 4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФИЛЬТРО-ОХЛАЖДАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ.

Решение второй и третьей вспомогательных задач исследования посвящено экспериментальной оценке степени влияния геометрических размеров и конструктивных решений фильтро-охлаждающих элементов обработки выхлопных газов на интенсивность процессов тепломассообмена, а также разработки конструктивных решений по обеспечению физических условий: равномерности подачи потока газов на выходе из ФОЭ; предотвращению уноса воды газами на выходе из него, а также контактной поверхности в системе «газ-вода» при барботаже.

4.1. Прогностическая оценка степени влияния геометрической конфигурации фильтро-охлаждающего элемента на интенсивность процессов теплообмена в системе «газ-вода»

В ходе численного моделирования была выполнена оценка степени влияния относительной высоты рабочей камеры ФОЭ скорость охлаждения выхлопных газов в процессе их обработки (рис. 4.1). Результаты расчетов приведены для двух вариантов конструктивного исполнения рабочей камеры (рис. 2.1): в виде пустотелого цилиндра и в виде цилиндра с направляющими пластинами. На графике (рис. 4.1) ось ординат соответствует безразмерной высоте колонны $\bar{H} = \frac{y}{H}$. Отсчет этой высоты производится от нижней входной плоскости (совпадающей с осью OX).

Полученные результаты подтверждают необходимость установки внутри фильтро-охлаждающего элемента направляющих пластин. При таком варианте величина отрицательного градиента температуры практически линейно зависит от высоты ФОЭ, увеличиваясь до 12 °С на 1 отн. ед. длины фильтра в сравнении с пустотелым цилиндром. Темп охлаждения выхлопных газов при этом составил

40 °С на метр высоты ФОЭ при температуре воды на входе в элемент, находящейся в пределах 26 ± 1 °С.

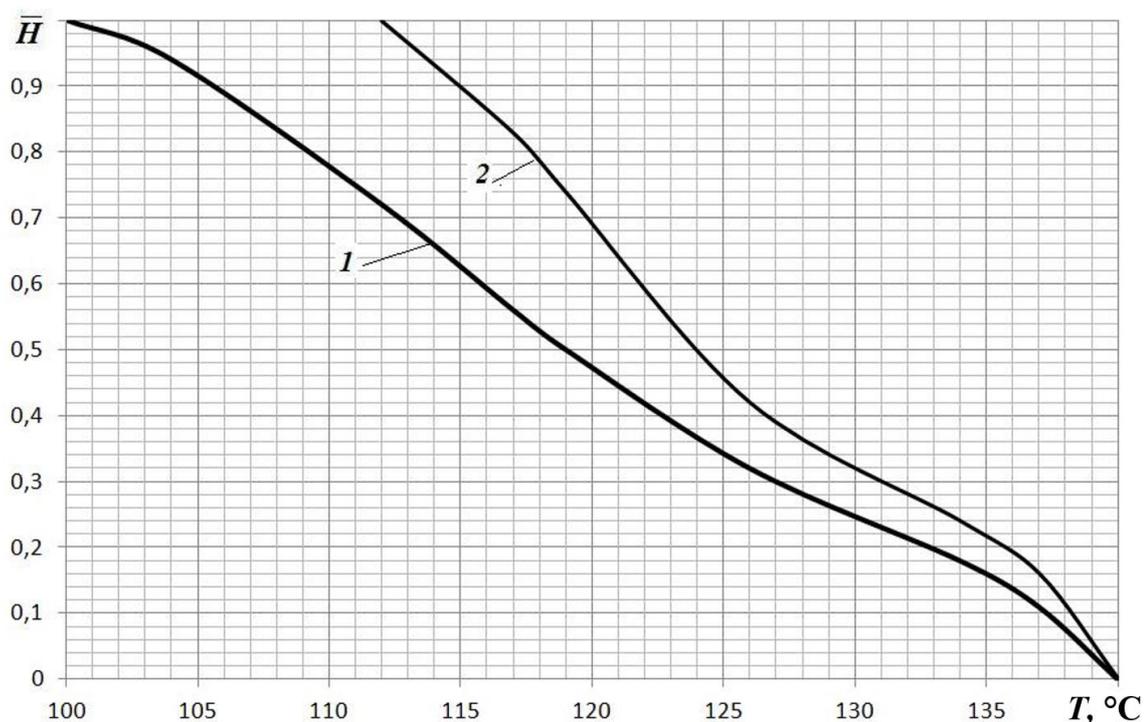


Рис. 4.1. Распределение температуры смеси газа и воды по высоте ФОЭ: 1 –цилиндр с направляющими пластинами; 2 – пустотелый цилиндр.

В ходе расчетов были получены результаты, показывающие, каким образом во времени изменяется скорость подъема выхлопных газов внутри ФОЭ (рис. 4.2). Расчет производился для трех значений вязкости полученной смеси внутри элемента: $\mu = 10^{-3}$ Па·с, $\mu = 10^{-2}$ Па·с, $\mu = 10^{-1}$ Па·с и для трех значений начальной (входной) скорости выхлопных газов: 2 м/с; 3,4 м/с; 5 м/с. По сути получена разгонная характеристика ФОЭ по скорости потока газов с постоянной времени $T_v \approx 0,8$ с. При этом интенсивность подъема газов в ФОЭ линейно зависит от их входной скорости, в то время как вязкость смеси на скорость подъема пузырьков газа практически не влияет.

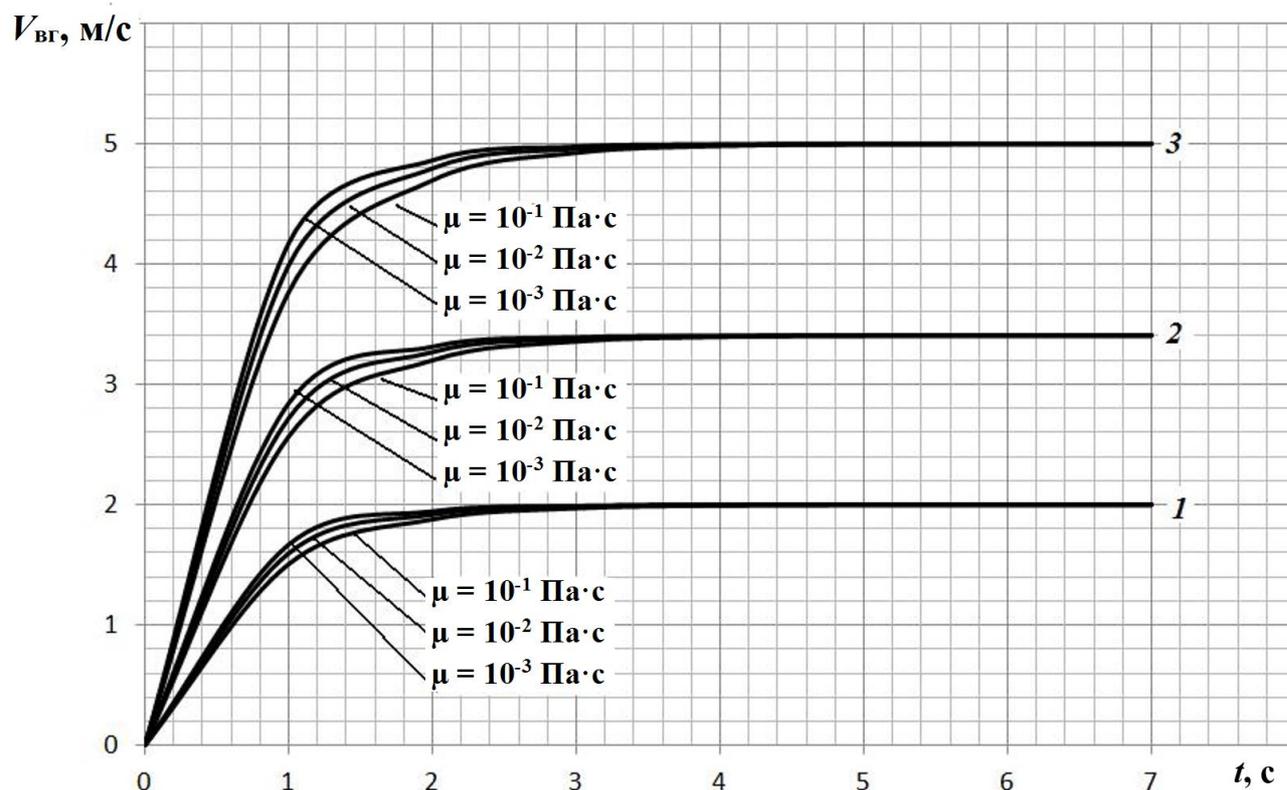


Рис. 4.2. Зависимость скорости подъема выхлопных газов от времени для трех значений вязкости: 1 – $V_{вг} = 2$ м/с; 2 – $V_{вг} = 3,4$ м/с; 3 – $V_{вг} = 5$ м/с.

Диаметр пузырьков на входе принимался постоянным равным 5 мм, а на выходе из ФОЭ их значения достигали у пустотелого цилиндра – 11 мм; у цилиндра с направляющими пластинами – 50 мм. Давление в нижней части элемента принималось равным сумме двух давлений – гидростатического давления внутри колонны и динамического напора потока входной скорости газая, значение которой в 5 м/с может рассматриваться как нижний порог для подачи судовых выхлопных газов на обработку.

В ходе расчетов была выполнена также оценка изменения величины скорости диффузии NO_x в воду (рис. 4.3). В зависимости от высоты ФОЭ, которая изменялась нелинейно по убывающей экспоненте. Максимальный отбор токсичной компоненты выхлопных газов происходит в нижней части ФОЭ, который составляет 0,0083 м/с и понижается почти в 4 раза на высоте $0,5\bar{H}$. При значении $0,8\bar{H}$ диффузия

прекращается. Это позволяет после экспериментального подтверждения поставить вопрос об уменьшении высоты фильтро-охлаждающего элемента на 20%.

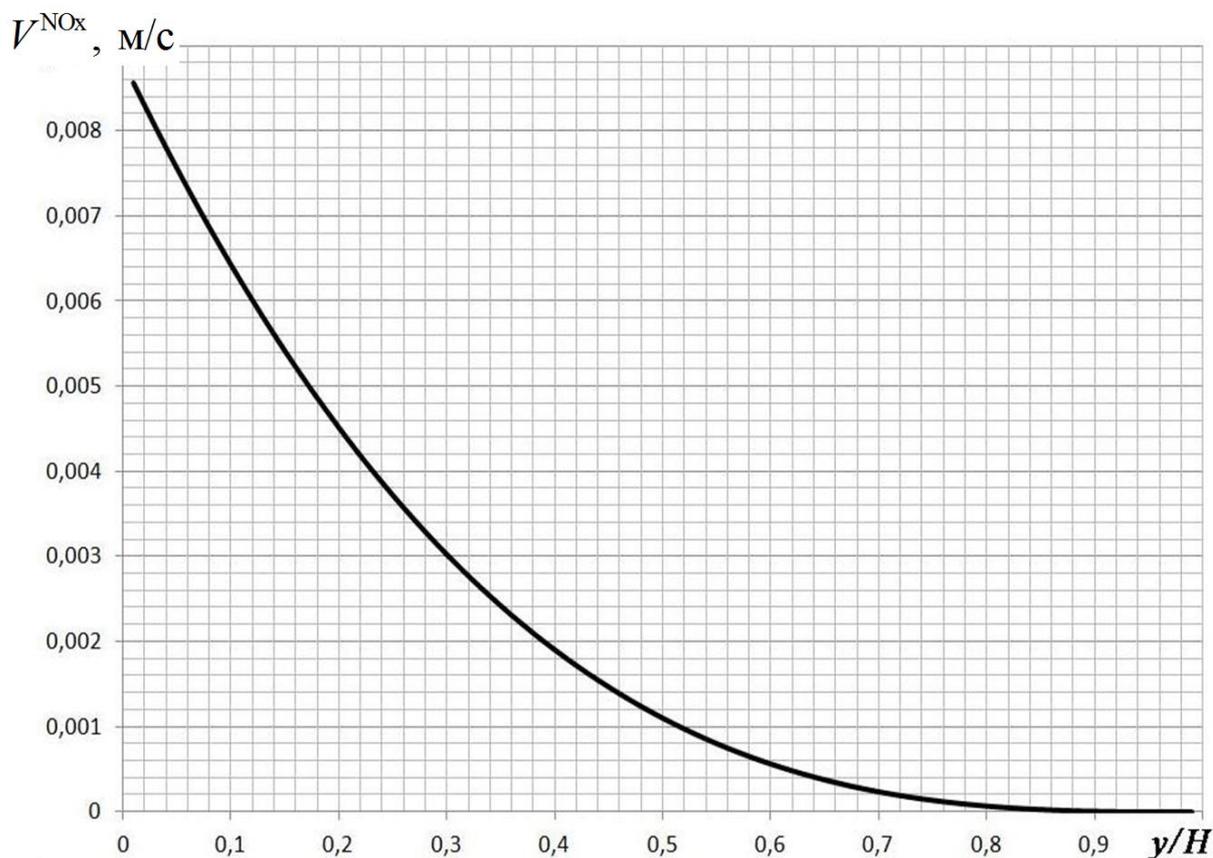


Рис. 4.3. Характер изменения скорости диффузии оксида азота по высоте ФОЭ

Расчетная зависимость площади контактного межфазного взаимодействия от скорости подачи выхлопных газов в ФОЭ представлена на рис. 4.4. Расчеты показали, что увеличение приращения площади контакта достигло максимума (около $9 \text{ м}^2/(\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$) при скорости подачи выхлопных газов 5 м/с и более. После этого значения площадь контакта выхлопных газов с водой резко увеличивается, и, именно, величина входной скорости газа равная 5 м/с может рассматриваться как нижний порог для подачи судовых выхлопных газов на обработку.

При скорости подачи газа равной 2 м/с приращение площади контакта составляет $0,7 \text{ м}^2/(\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$, что почти в 13 раз меньше максимальной в рассматриваемом диапазоне.

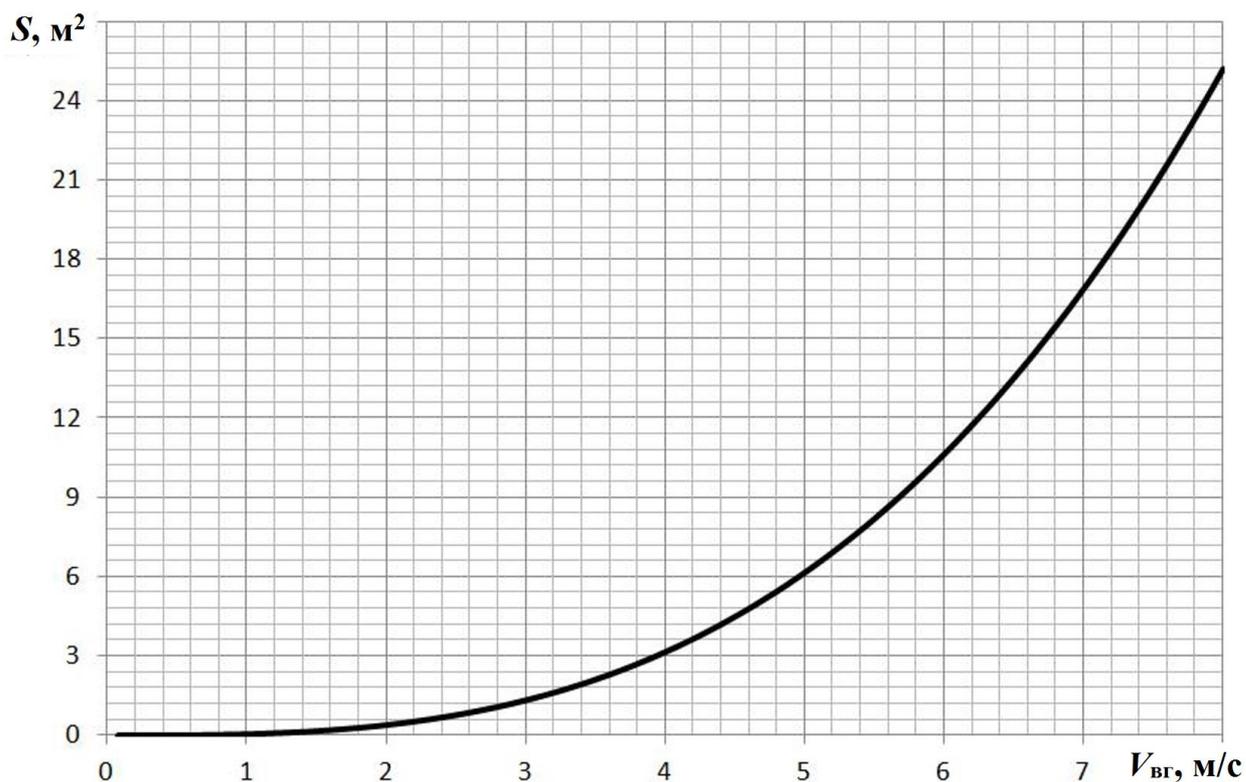


Рис. 4.4. Зависимость расчетной площади контактного взаимодействия от скорости подачи выхлопных газов на входе в ФОЭ

Научным результатом решения второй вспомогательной задачи являются следующие утверждения:

- максимальный отбор оксида азота из выхлопных газов достигается в нижней части фильтро-охлаждающего элемента, а начиная с высоты, превышающей $0,7H$ высоты рабочей камеры H , диффузия оксидов азота в воду резко падает и практически прекращается, при увеличении высоты до $0,8H$ и выше

- площадь контактного взаимодействия выхлопных газов с водой зависит от скорости их введения в фильтро-охлаждающий элемент – начиная с величины 5 м/с, она резко увеличивается более чем на порядок и именно это значение может рассматриваться как нижний порог скорости подачи судовых выхлопных газов на обработку;

Решение третьей вспомогательной задачи предполагало разработку конструктивных решений по обеспечению физических условий: равномерности подачи потока газов на выходе из ФОЭ; предотвращению уноса воды газами на выходе из него, а также интенсификации межфазного взаимодействия в системе «газ-вода» при барботаже.

Полученные результаты теоретической (прогностической) оценки величины давления внутри пузырьков выхлопных газов при их всплывании в водяном столбе представлены на рис. 4.5. На графике отображены два варианта – фильтрационная камера с направляющими разделительными пластинами и камера, в которой пластины отсутствуют. Эти конструктивные решения отличаются между собой (с точки зрения обработки выхлопных газов) получаемыми размерами пузырьков в верхней части водяного столба.

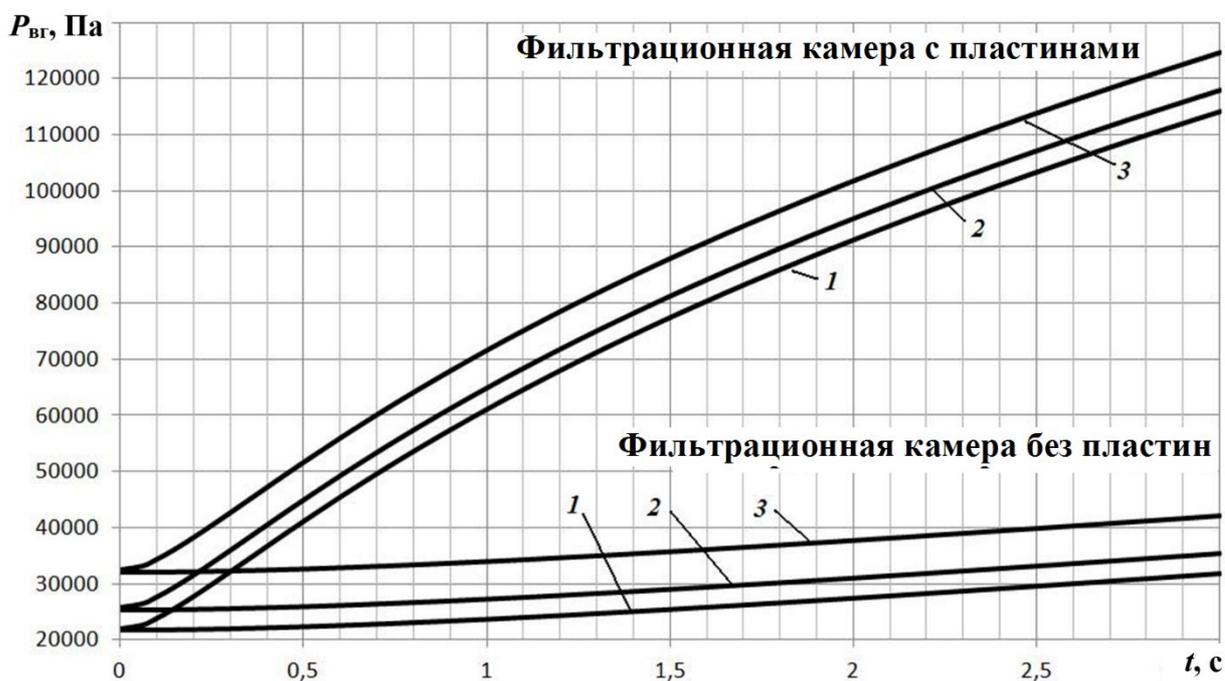


Рис. 4.5. Характер изменения расчетного давления внутри пузырьков выхлопных газов на входе в ФОЭ при различных скоростях их подачи:

1 – $V_{вх} = 2$ м/с; 2 – $V_{вх} = 3,4$ м/с; 3 – $V_{вх} = 5$ м/с.

При одинаковой скорости выхлопных газов на входе в ФОЭ перепад давления изменяется для пустотелого элемента всего лишь в 1,3 раза, а для оснащенного пластинами – в 40 раз. Скорость газов на входе в ФОЭ увеличивает величину сопротивления внутри пузырьков газа.

Изменение скорости подъема пузырьков выхлопных газов различного диаметра в зависимости от их скорости на входе в фильтро-охлаждающий элемент после распределительной решетки имеет линейный характер (рис. 4.6). Однако рост скорости при увеличении диаметра пузырька явно нелинейный и требует дальнейшего изучения. Диаметр пузырька d_n задается на дне колонны при помощи раздаточной решетки.

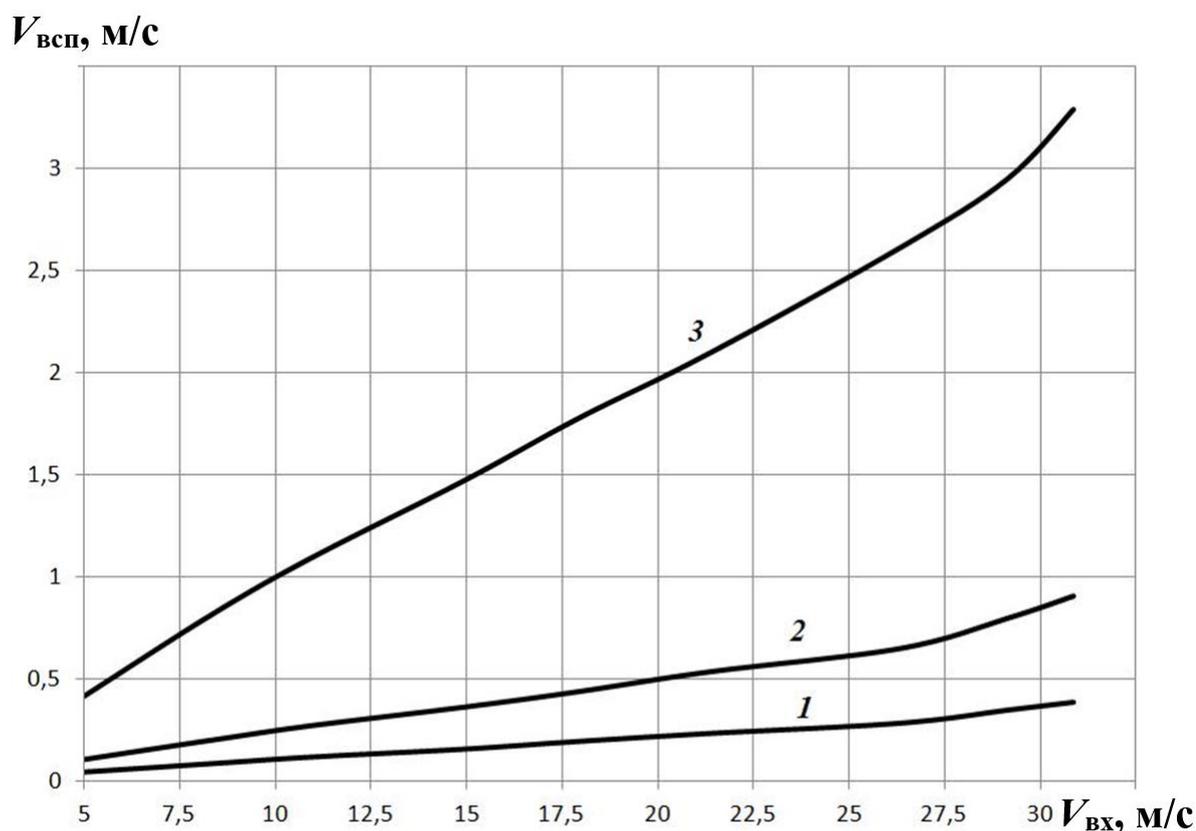


Рис. 4.6. Изменение скорости подъема пузырьков выхлопных газов в зависимости от их диаметра и скорости на входе в ФОЭ: 1 – $d_n = 3$ мм; 2 – $d_n = 5$ мм; 3 – $d_n = 6$ мм.

Таким образом, научным результатом найденного решения третьей вспомогательной задачи является установленный факт того, что для повышения эффективности процесса обработки судовых выхлопных газов необходимо увеличивать поверхность контакта судовых выхлопных пузырьков газов с водой внутри ФОЭ. Конструктивно это возможно сделать путем генерирования в нижней части элемента газовых пузырьков минимального диаметра и выбором угла наклона направляющих пластин внутри фильтро-охлаждающих элементов равным 30° , что обеспечит удвоение продолжительности контакта выхлопных газов с водой при сохранении допустимого уровня гидростатического сопротивления. Также, поскольку часть воды будет уноситься выхлопными газами, для задержки капель воды необходимо в верхней части фильтрующей камеры устанавливать каплеотбойники (см. рис. 3.3).

4.2. Результаты экспериментальных исследований по оценке процессов фильтрации и охлаждения выхлопных газов

Решение главной задачи исследования заключается в применении метода синтеза для создания принципа работы фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов судового дизеля с последующей разработкой методики построения ее технологической схемы, конструктивных решений и эксплуатации.

Синтез предусматривает использование методов математического моделирования для прогноза характеристик процесса барботажа при проектировании ФОЭ, математического конструирования при его изготовлении и конечно – разностного метода при проведении натурных испытаний элемента.

Результатом синтеза должен стать принцип работы ФОУ дизеля, связанный с ее функционированием, структурой и управлением. С этой целью были проведены натурные исследования ФОУ ВГ судового главного дизеля на танкере-химовозе “Аму”.

Во время проведения экспериментальных исследований имели место следующие рабочие параметры выхлопных газов и геометрические размеры подводных линий:

- диапазон расхода выхлопных газов на входе в установку – от 4000 до 10000 м³/ч (от 1,1 до 2,8 м³/с);
- температура выхлопных газов в газовом тракте после утилизационного котла (на входе в фильтро-охлаждающий элемент): 140 °С;
- диаметр цилиндрической части судового дымохода: 1 м;
- диаметр входа в фильтрационную колонну: 0,1 м;
- внутренние габаритные размеры ФОЭ: длина: 1 м; ширина: 1 м; высота: 2,5 м;
- скорость выхлопных газов на входе в ФОЭ: от 1,4 до 3,5 м/с.
- концентрация NO_x в выхлопных газах после утилизационного котла: от 28 до 60 г/кВт·ч;
- концентрация SO_x в выхлопных газах после утилизационного котла: от 11 до 29 г/кВт·ч.

При проведении экспериментальных исследований изучен характер понижения температуры выхлопных газов по высоте фильтро-охлаждающего элемента судового узла обработки выхлопных газов [15]. Замеры температуры осуществлялись в пяти измерительных створах, расположенных по высоте рабочей камеры на одинаковых расстояниях (см. рис. 2.1). На рис. 4.7 представлены полученные результаты изменения температурного напора в зависимости от величины объемного расхода подаваемых выхлопных газов. Каждая экспериментальная точка соответствует набору из пятидесяти измерений и является результатом их осреднения [16].

В связи с этим можно предполагать, что рост скорости (расхода) газового потока на входе в фильтрующую колонну приводит к ухудшению процесса отбора тепла, а сокращение времени контактного взаимодействия рабочих тел приводит к уменьшению разности температуры выхлопных газов на входе и выходе в ФОЭ. Как следует из графика, изменение скорости газа всего на 2 м/с привело к увеличению температуры на выходе с 90 до 98 °С, но с учетом погрешности измерения температуры газов ± 5 °С такие утверждения требуют уточнений.

Ввиду нелинейности процесса охлаждения по высоте ФОЭ равной 2,5 м, площадью поперечного сечения его камеры, равной 1 м, с учетом погрешности измерения температуры газовой смеси, неопределенности степени влияния на процесс скорости подачи газа, а также совпадения тенденций его прохождения с расчетными данными предлагается эмпирическая зависимость изменения температуры выхлопных газов в зависимости от высоты ФОЭ представленную линейно-кусочной функцией:

$$t_{\text{ВГ(ВЫХ)}} = \begin{cases} t_{\text{ВГ(ВЫХ)}} - 14H & \text{при } 0 \leq H \leq 1; \\ t_{\text{ВГ(ВЫХ)}} - 16(H - 0,125) & \text{при } 1 \leq H \leq 2; \\ t_{\text{ВГ(ВЫХ)}} - 30(H - 1) & \text{при } 2 \leq H \leq 2,5. \end{cases} \quad (4.1)$$

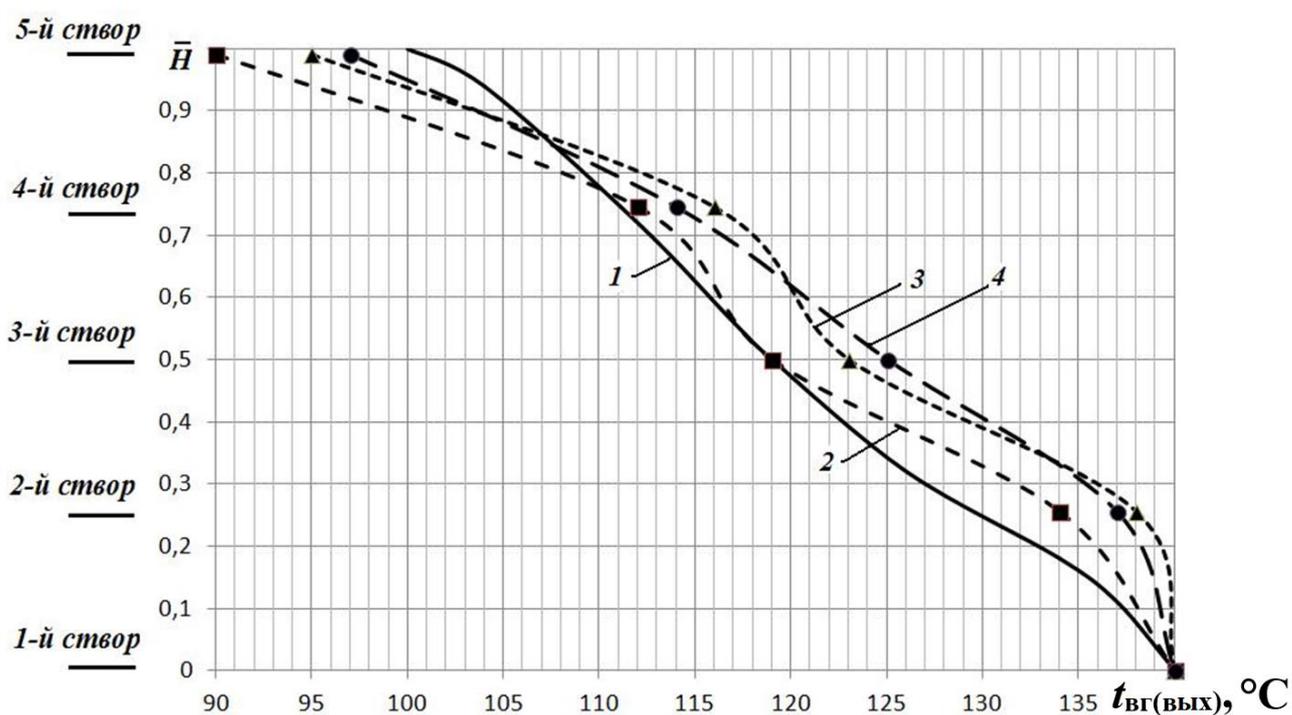


Рис. 4.7. Тенденция распределения температуры газовой смеси по высоте элемента в зависимости от скорости подачи выхлопных газов:

1 — расчет; 2 — $V = 1,415$ м/с; 3 — $V = 2,739$ м/с; 4 — $V = 3,538$ м/с

Таким образом, глубина охлаждения газов ФОЭ достигает 1,4 раза или 30% от их температуры на входе.

В ходе проведения экспериментальных исследований была выполнена оценка степени эффективности очистки выхлопных газов от вредных составляющих NO_x и SO_x . На рис. 4.8 и 4.9 для различных значений площади контакта выхлопных газов с водой показаны разности концентраций на входе и выходе из установки [16]. При неизменном значении объемного расхода газа и одинаковых конструктивных размерах установки различная площадь контакта достигалась изменением размеров газовых пузырьков на входе в ФОЭ.

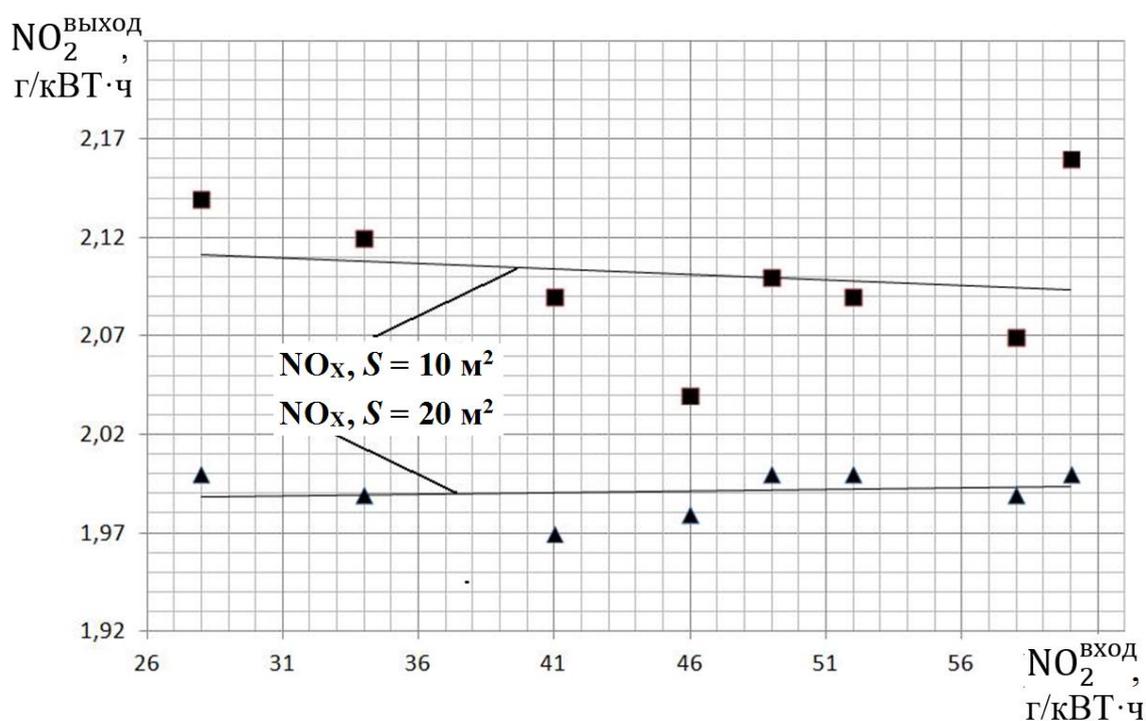


Рис. 4.8. Тенденция падения концентрации NO_x в ФОЭ при постоянной величине площади контакта сред «газ-вода»

Полученные результаты хорошо согласуются с известным качественным результатом: оксиды серы в воде растворяются менее интенсивно, чем оксиды азота [17]. Приведенные на графиках результаты были получены при одних и тех же условиях эксперимента, но при этом их сравнение показывает, что падение

концентрации оксидов серы было на 6,7 % меньше в сравнении со случаем изменения концентрации оксидов азота. Поэтому сера должна удаляться из топлива до его сжигания, т.е. на стадии топливopодготовки.

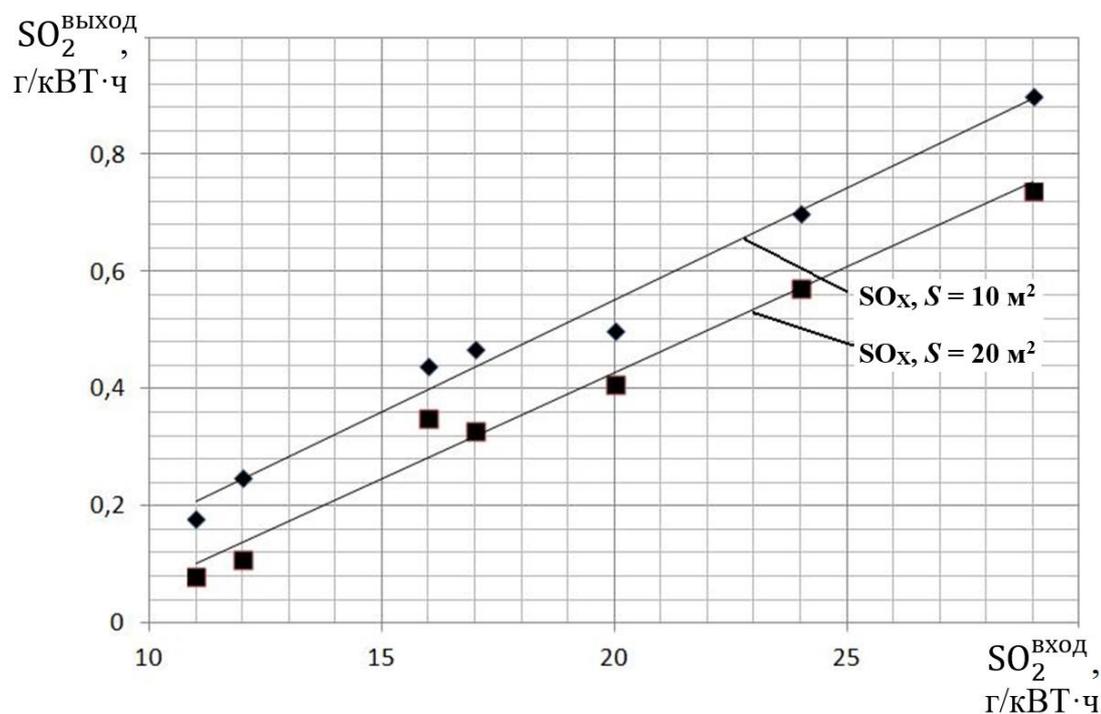


Рис. 4.9. Тенденция падения концентрации SO_x в зависимости от площади контакта сред «газ-вода»

Эмпирическая зависимость $NO_2^{\text{ВЫХОД}} = f(NO_2^{\text{ВХОД}}, S)$ представляется в линейном виде:

$$NO_2^{\text{ВЫХОД}} = NO_2^{\text{ВХОД}} / [0,1 - 0,005S + (0,425 + 3,75 \cdot 10^{-3}S)NO_2^{\text{ВХОД}}]. \quad (4.2)$$

Эмпирическая зависимость $SO_2^{\text{ВЫХОД}} = f(SO_2^{\text{ВХОД}}, S)$ представлена в линейном виде:

$$SO_2^{\text{ВЫХОД}} = (0,0455 - 5,5 \cdot 10^{-4}S)SO_2^{\text{ВХОД}} - 0,004S - 0,22. \quad (4.3)$$

Подобное расхождение может быть объяснено различными значениями дисперсии данных при проведении измерений выходной концентрации, спецификой проходящих внутри фильтро-охлаждающего элемента физико-химических процессов и других эффектов, выходящих за рамки проводимых исследований.

Следует отметить, что приведенные на графиках значения площади контакта (10 и 20 м²) являются приближенными, поскольку при проведении исследований принималось, что пузырьки имеют сферическую форму и, что их диаметр равен диаметру отверстий выпускного коллектора, а генерируемое количество определяется расходом выхлопных газов. В действительности, как видно на экспериментальных фотографиях, взятых из работы [103] и показанных на рис. 4.10, форма воздушного пузырька при подъеме в водяном столбе становится близка к плоской линзе, что в применении к обработке водой выхлопных газов может рассматриваться, как положительный результат, приводящий к росту площади контакта.

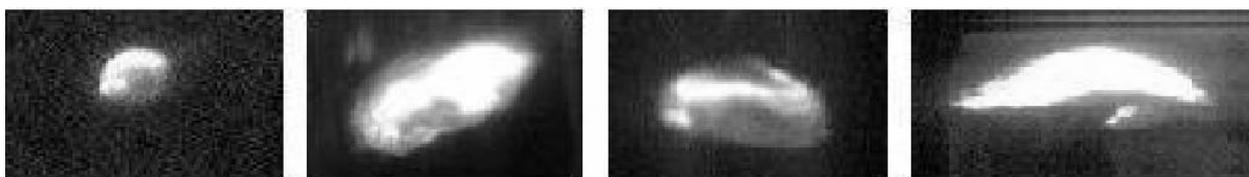


Рис. 4.10. Трансформация формы воздушного пузырька при всплывании в неподвижной воде [103]

Результаты оценивания эффективности функционирования ФОЭ выполненного в виде оребренной квадратной призмы площадью 1,0 м² и высотой 2,5 м при скорости движения газов до 5 м/с показали, что в процессе его совместной работы с главным двигателем глубина:

- охлаждения газа составила (1,4 раза) или на 28%;
- снижения концентрации NO₂ (300 раз) или на 99,7%;
- снижения концентрации SO_x (40 раз) или на 97,7%.

4.3. Принцип работы фильтро-охлаждающей установки, интегрированной в технологический контур судового главного дизеля

В ходе экспериментальных исследований установлено, что главный двигатель танкера – химовоза «Аму» фирмы Hyundai (Южная Корея) располагал следующими характеристиками:

| | |
|---|------------------|
| – диаметром цилиндра (м) | 0,50 |
| – ходом поршня (м) | 2,90 |
| – объемом цилиндра (м ³) | 1,45 |
| – количеством цилиндров (ед.) | 6 |
| – средним давлением наддува (Па) | $2,5 \cdot 10^5$ |
| – секундной объемной скоростью выхлопных газов на режимах хода судна (м ³ /с): | |
| – СМПХ (28 мин ⁻¹) | 3,0 |
| – МПХ (35 мин ⁻¹) | 3,6 |
| – СПХ (48 мин ⁻¹) | 5,0 |
| – ПХ (70 мин ⁻¹) | 7,4 |
| – ППХ (120 мин ⁻¹) | 12,6 |

Если принять во внимание, что давление подъема невозвратного входного клапана ФОЭ колеблется в пределах $0,25 \div 0,35 \cdot 10^5$ Па (рис. 4.3), полное падение давления газов в ФОЭ – в пределах $1,15 \div 1,25 \cdot 10^5$ Па при изменении секундной объемной скорости выхлопных газов в пределах $2 \div 5$ м³/с, максимальное давление нагнетания ГНТ двигателя превышает $1,7 \cdot 10^5$ Па, то работа фильтро-охлаждающего устройства ФОУ главного двигателя должна быть направлена на поддержание величины максимально-неизбежного падения давления газов в ФОЭ равной $1,25 \cdot 10^5$ Па при $V_{в.г.} = 5$ м³/с. При таких условиях требуется параллельная работа не менее трех ФОЭ для работы главного двигателя на ППХ, т.е. минимально-необходимое

количество параллельно работающих ФОЭ (N) равно $12,6/5 = 2,52$, с точностью до целого – 3 единицы.

Кроме этого, из технологических условий по регенерации воды требуется наличие хотя бы одного резервного ФОЭ. Такие дополнительные функции резервирования и регенерации могут быть реализованы одним ФОЭ.

В результате решения главной задачи исследования установлены следующие принципы работы ФОУ очистки выхлопных газов:

- функциональные:
 - степень охлаждения до 30%;
 - степень фильтрации NO_x - 99,7%;
 - степень фильтрации SO_x - 97,7%;
- структурные:
 - количество ФОЭ (ед.) – 4;
 - резерв на регенерацию ФОЭ (ед.) – 1;
 - связи однозначные;
- управление:
 - регулируемый параметр падения давления газов в ФОЭ (максимум $1,25 \cdot 10^5$ Па)
 - тип управления дискретный
 - порядок работы ФОЭ ступенчатый
 - диапазон работы ФОЭ до ($\text{м}^3/\text{с}$) 5,0
 - диапазон работы ФОУ до ($\text{м}^3/\text{с}$) 15,0 (max 20,0)
 - время разгона ФОЭ по давлению газов (с) 3,0
 - постоянная времени ФОЭ по давлению газов (с) 1,0
 - период циклической работы ФОЭ (с) 1500÷2000
 - период цикла регенерации ФОЭ (с) 300÷360

Научным результатом найденного решения главной задачи стало установление, того что для повышения эффективности очистки выхлопных газов от вредных составляющих NO_x и SO_x при неизменном значении объемного расхода и одинаковых конструктивных размерах установки определяющим фактором является площадь межфазного контакта, а также то, что оксиды серы в воде растворяются менее интенсивно, чем оксиды азота. Число работающих ФОЭ, которые должны быть задействованы в рабочем процессе, определяется нагрузкой на дизель, а периодичность циклической работы ФОЭ устанавливается по падению концентрации NO^x и SO^x в газах на выходе из ФОЭ.

4.4. Выводы по разделу 4

Результаты расчетов с использованием разработанной математической модели указывают на необходимость установки внутри объема фильтро-охлаждающего элемента направляющих пластин, что позволит увеличить температурный перепад в газовом потоке за счет увеличения размера пузырьков выхлопных газов в процессе подъема.

Скорость подъема пузырьков выхлопных газов внутри ФОЭ достигает постоянства за три секунды начала движения газов внутри элемента, вне зависимости от скорости их подвода или вязкости получаемой смеси газа с водой.

Максимальный отбор оксида азота из выхлопных газов достигается в нижней части фильтро-охлаждающего элемента, а начиная с высоты, превышающей 0,7 высоты рабочей камеры H , диффузия оксидов азота в воду резко падает и, практически, прекращается, при увеличении высоты до $0,8H$ и выше.

Площадь контактного взаимодействия выхлопных газов с водой зависит от скорости их ввода в фильтро-охлаждающий элемент – начиная с величины 5 м/с, она резко увеличивается более чем на порядок, и именно это значение может рассматриваться, как нижний порог скорости подачи судовых выхлопных газов на обработку.

Для повышения эффективности процесса обработки судовых выхлопных газов необходимо увеличивать поверхность контакта судовых выхлопных пузырьков газов с водой внутри ФОЭ. Конструктивно это возможно сделать путем генерирования в нижней части элемента газовых пузырьков максимального диаметра и выбором угла наклона направляющих пластин внутри фильтро-охлаждающих элементов таким образом, чтобы обеспечить максимально длительный контакт выхлопных газов с водой.

Использование приведенного перечня измерительных приборов и оборудования позволило получить максимальную погрешность экспериментальных результатов 1,5 %.

При изучении градиента температуры выхлопных газов по высоте фильтрационной колонны было установлено, что рост скорости (расхода) газового потока на входе в ФОЭ приводит к ухудшению процесса отбора тепла. Сокращение времени контактного взаимодействия приводит к уменьшению разности температур выхлопных газов на входе и выходе.

При экспериментальной оценке степени эффективности очистки выхлопных газов от вредных составляющих NO_x и SO_x было установлено, что при неизменном значении объемного расхода и одинаковых конструктивных размерах установки определяющим фактором является площадь межфазного контакта, а также, то что оксиды серы в воде растворяются менее интенсивно, чем оксиды азота.

Число работающих ФОЭ, которые должны быть задействованы в рабочем процессе, определяются нагрузкой на дизель, а периодичность циклической работы ФОЭ устанавливается по падению концентрации NO_x и SO_x в газах на выходе из ФОУ.

Содержание раздела 4 представлено автором в [15-17, 21-25].

РАЗДЕЛ 5

ПРИНЦИП РАБОТЫ И МЕТОДИКА ТЕПЛОМАССООБМЕННОГО РАСЧЕТА,
КОНСТРУИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ФИЛЬТРО-
ОХЛАЖДАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

5.1. Расчетная математическая модель процесса очистки выхлопных газов

Построение математической модели предполагает возможность пересчета работы ФОУ на оптимальный режим эксплуатации. В частности, модель должна допускать:

- внесение конструктивных изменений в технологию очистки за счет дополнительной установки направляющих пластин внутри рабочей камеры фильтрационной кассеты;
- изменение габаритных размеров установки и соответственно оптимизацию соотношения между расходами выхлопных газов и воды в фильтрационных элементах.

Построение модели предусматривает развитие четырех этапов [50, 58, 67, 72, 82, 93-95, 102, 108-109].

5.1.1. Первый этап – расчет характеристик потока выхлопных газов на входе в ФОУ, исходными данными для которого являются:

- массовый расход топлива, G_m ;
- зольность топлива, A ;
- степень очистки выхлопных газов в золоуловителях, η ;
- выход компонентов топлива при его сжигании, R_{CO}, N_{NO_x} ;
- потери теплоты вследствие химической и механической неполноты сгорания топлива, q_3, q_4 ;
- начальное содержание серы в топливе N_{Sr} ;

– доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива N_{SO} , и доля улавливаемых оксидов серы N'_{SO_x} ;

– плотность ρ , массовая концентрация χ_m и вязкость μ компонентов выхлопных газов и воды.

– физические характеристики и константы составляющих выхлопных газов.

После сбора необходимой исходной информации рассчитываются следующие параметры:

– массовый расход твердых частиц сажи Q_c , (г/с):

$$Q_c = G_m A \chi (1 - \eta), \quad (5.1)$$

где G_m – расход мазута на сжигание, г/с; A – зольность мазута, %; χ – константа, зависящая от типа дизеля и качества используемого мазута [$\chi \in 0,001; 0,007$]; η – доля твёрдых частиц, улавливаемых в золоуловителях [$\eta \in 0; 1$];

– массовый расход монооксида углерода Q_{CO} , (г/с):

$$Q_{CO} = 0,001 R_{CO} B \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) = 0,001 (q_3 R Q_{н.с.}) B \left(1 - \frac{q_4}{100} \right), \quad (5.2)$$

где R_{CO} – выход CO при сжигании топлива; B – числовая константа ($B \in [0,953; 1,1]$); q_3 – потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, %; R – безразмерный коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива из-за присутствия в продуктах сгорания CO; $Q_{н.с.}$ – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; q_4 – потери теплоты вследствие механической неполноты сгорания топлива, %;

– массовый расход окислов серы Q_{SO_x} , (г/с):

$$Q_{SO_x} = 0,02N_{Sr} (1 - N_{SO_x}) (1 - N'_{SO_x}), \quad (5.3)$$

где N_{Sr} – исходное содержание серы в топливе; N_{SO_x} – доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива; N'_{SO_x} – доля улавливаемых оксидов серы;

– массовый расход оксидов азота Q_{NO_x} , (г/с):

$$Q_{NO_x} = 0,001Q_{н.с.} N_{NO_x} (1 - \alpha), \quad (5.4)$$

где N_{NO_x} – количество оксидов азота, образующихся на 1 ГДж теплоты при использовании топлива; α – безразмерный коэффициент, зависящий от степени снижения оксидов азота в результате применения новых конструктивных или технологических решений ($\alpha \in [0;1]$).

При пересчете на составляющие NO_x выражение (5.4) используется следующим образом:

– пересчет на NO_2 : $Q_{NO_2} = 0,8Q_{NO_x}$;

– пересчет на NO : $Q_{NO} = 0,13Q_{NO_x}$.

Плотность многофазной смеси фильтрационной воды с выхлопными газами ρ , а также величина массовой концентрации χ_m соответствующих компонент судовых выхлопных газов находятся по приведенным ранее выражениям (1.3) и (1.4).

Динамическая вязкость μ движущегося многофазного потока выхлопных газов и фильтрационной воды внутри рабочей камеры установки находится по выражению (1.5).

Скорость диффузии i -й компоненты выхлопных газов в воду V^* с учетом изменения ее концентрации по высоте фильтро-охлаждающего элемента рассчитывается по формуле (1.8).

5.1.2. Второй этап – определение геометрических размеров рабочей камеры

установки, которые непосредственно влияют на качество очистки.

Исходными данными являются:

- объемный расход выхлопных газов $Q_{в.г.}$;
- геометрическая форма рабочей части – цилиндр диаметром d и высотой h ;
- температура выхлопных газов на входе и выходе в установку t', t'' ;
- давление на входе в установку $P_{вх}$;
- диаметры входного и выходного патрубков установки $d_{вх}$ и $d_{вых}$;
- диаметр отверстий решетки для создания пузырьков d_p ;
- ширина проходных каналов в каплеуловителе b_k .

По режиму работы дизеля определяется число работающих фильтро-охлаждающих элементов N и, затем, рассчитываются все их характеристики.

При задании высоты судового фильтро-охлаждающего элемента h (идентичной для всех остальных рабочих частей) необходимо учитывать, что она должна обеспечивать возможность прохождения пузырьками выхлопных газов всего пути без падения величины их объема. В первом приближении время схлопывания t_c сферического пузырька выхлопных газов с радиусом R в воде под действием величины гидростатического давления $P_{ст}$ можно определять с использованием формулы Рэлея [52]:

$$t_c = 0,915R_0 \sqrt{\frac{\rho_{жс}}{P_{ст}}}, \quad (5.5)$$

где R_0 – начальный радиус пузырька (берется при расчетах равным диаметру отверстий направляющей решетки); $\rho_{жс}$ – плотность жидкости.

Это время необходимо сопоставлять с характерным временем всплывания выхлопных газов t . При этом следует учитывать, что время всплывания одиночного пузырька, рассчитываемого по выражениям (2.3) или (2.4) отличается от времени всплывания группы пузырьков. В барботирующем слое пузырьков при их подъеме в

воде начнет возникать эрлифтный эффект, в ходе которого пузырьки будут увлекать за собой, т. е. приводить в движение часть объема жидкости. В результате время прохождения фильтро-охлаждающего элемента будет увеличиваться и, в соответствии с рекомендациями работы [3], должно определяться по эмпирической формуле вида

$$t = \frac{h^{0,667}}{V}. \quad (5.6)$$

Объем рабочей камеры ФОЭ находится исходя из заранее задаваемого объема потока выхлопных газов и времени его нахождения в элементе

$$W_{p.k.} = \frac{Q_{в.в.} \cdot t}{N}, \quad (5.7)$$

где $Q_{в.в.}$ – массовый расход выбрасываемых в атмосферу вредных веществ, г/с; N – число фильтрационных кассет ($N \in 1; 4$).

Площадь основания рабочей части – круга и его диаметр определяется по формулам

$$S_{p.k.} = \frac{W_{p.k.}}{h}, \quad (5.8)$$

$$d = \sqrt{4S_{p.k.}/\pi}. \quad (5.9)$$

Объем фильтрационной воды должен быть меньше чем объем рабочей части. Разность высот (рабочей части и водяного столба в ней) соответствует пустому пространству, отводимому в верхней части фильтро-охлаждающего элемента на процессы пенообразования и отделение захваченных обработанными выхлопными

газами капель воды. Экспериментально установлено, что разность объемов составляет 15 %. Тогда объем фильтрационной воды составит:

$$W_{ф.в.} = 0,85W_{р.к.} \quad (5.10)$$

Скорость подъема выхлопных газов внутри фильтро-охлаждающего элемента в зависимости от температуры воды для различных диаметров их пузырьков определяется формулой (2.17).

Определяется число Рейнольдса внутри фильтро-охлаждающего элемента с учетом пересчитанной ранее вязкости многофазного потока:

$$Re = \frac{V(0,85h)}{\nu} \quad (5.11)$$

Такой переход от динамической к кинематической вязкости должен производиться с учетом пересчитанной плотности получаемого многофазного потока. Характерным размером выступает высота столба фильтрационной воды.

Далее выполняются оценки:

- параметра эффективного градиента сдвига гидродинамического поля внутри элемента по выражению (1.9);
- условия равновесия пузырьков газа в фильтрационной воде по выражению (1.11).

В случае пересчета установки на большую или меньшую производительность используются критерии подобия (1.12).

Находится суммарная сила F_c лобового гидродинамического сопротивления на пузырьки выхлопных газов при их движении вверх внутри столба фильтрационной воды по (2.5) с учетом (2.7-2.12).

Численное значение S' поверхности межфазного взаимодействия (раздела), образующейся в единицу времени, определяется по формуле (3.9).

Коэффициент массопередачи J_m водяной пленки на поверхности раздела выхлопных газов с водой в зависимости от числа Re рассчитывается по формуле (3.2) или (3.3).

Оценка общей массы Δm составляющих выхлопных газов, растворившихся в воде за время фильтрации Δt , осуществляется по выражению (3.11).

Величина снижения концентрации ΔC компонент выхлопных газов определяется по выражению (3.12).

Коэффициент фильтрации K_f выхлопных газов определяется по формуле (3.13).

Давление на выходе из одного фильтро-охлаждающего элемента находится путем вычитания от величины входного давления газов всех возникающих потерь давления на различных этапах очистки:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} - \Delta P_{\text{вх}} - \frac{F_c}{S'} - P'(t) - \Delta P_{\text{вых}} - \rho gh. \quad (5.12)$$

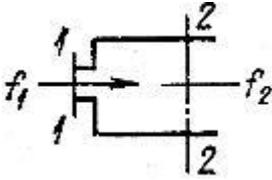
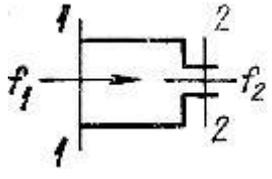
Второе слагаемое в выражении (5.12) соответствует местным потерям при расширении потока выхлопных газов на входе в элемент, а также при генерировании пузырьков на направляющей решетке. Эти две составляющие давления рассчитываются по известным формулам гидравлики для внезапного расширения с учетом заданных $d_{\text{вх}}$ и d_p (табл. 5.1).

Третье слагаемое в выражении (5.12) соответствует потерям давления, от сопротивления, которое возникает при подъеме пузырьков выхлопных газов на всю высоту водяного столба внутри рабочей части фильтро-охлаждающего элемента.

Четвертое слагаемое в выражении (5.12), описывает процесс взаимодействия пузырьков выхлопных газов с учетом их объединения и разрушения между собой. Оно рассчитывается по выражению (3.15).

Таблица 5.1

Местные потери при внезапном расширении и сужении

| Тип потерь | Схема | Формула |
|------------------------------|---|--|
| Внезапное расширение сечения |  | $\Delta P_{ex} = \xi \frac{\rho V^2}{2} = \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right)^2 \frac{\rho V^2}{2}$ |
| Внезапное сужение сечения |  | $\Delta P_{ex} = \xi \frac{\rho V^2}{2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right) \frac{\rho V^2}{2}$ |

Пятое слагаемое в выражении (5.12) соответствует местным потерям, возникающим в каплеуловителе, а также при сужении потока выхлопных газов на выходе из элемента. Оно определяется по формулам гидравлики, приведенным в табл. 5.1.

Шестое слагаемое в выражении (5.12) соответствует величине гидростатического давления водяного столба внутри фильтро-охлаждающего элемента.

Величина перепада давления газового потока на фильтро-охлаждающем элементе не должна превышать давление выхлопных газов теплового двигателя, особенно при его работе на частичной нагрузке. В таком случае следует решать вопрос об установке дополнительного вытяжного вентилятора.

Фильтрующая способность судовой ФОУ выхлопных газов оценивается с учетом размера получаемых пузырьков и суммарного объемного расхода газов. Для этих целей введен параметр фильтрации:

$$\Theta = Q_{в.г.} C_{ex} K_f K_{пц} n, \quad (5.13)$$

где $Q_{в.г.}$ – объемный расход выхлопных газов, поступаемых на один фильтро-охлаждающий элемент, м³/ч; n – число используемых фильтро-охлаждающих элементов.

В выражении (5.13) также учитывается фактор чистоты воды в фильтро-охлаждающем элементе путем ранее не использовавшегося и введенного в рамках выполненных исследований коэффициента рециркуляции K_{pc} , $K_{pc} \in [0,89; 0,99]$. Меньшие значения этого коэффициента применяются при загрязнении воды, а большие – при чистой воде.

5.1.3. Третий этап – расчет материального баланса судовых выхлопных газов при их прохождении через фильтрационные элементы.

Исходными данными являются:

- массовый расход судовых выхлопных газов и их компонентов, $M_{в.г.}$, M_i' , M_i'' ;
- число фильтро-охлаждающих элементов $N_{в}$ ФОУ;
- число основных компонент судовых выхлопных газов n ;
- степень очистки рабочей части, P .

На третьем этапе определяются следующие величины.

Массовый расход всех компонент судовых выхлопных газов на входе в фильтрационные элементы:

$$M_{в.г.} = N \sum_{i=1}^n (M_i' + M_i''), \quad (5.14)$$

где $M_{в.г.}$ – массовый расход судовых выхлопных газов, г/с; M_i' , M_i'' – массовый расход i -й компоненты на входе и выходе в установку, г/с; n – число основных компонент судовых выхлопных газов ($n = 5$, т.к. основные компоненты это: С, СО, SO₂, NO, NO₂)

Если известна степень очистки P и ее величина является идентичной для каждого фильтро-охлаждающего элемента, то массовый расход i -й компоненты на выходе из ФОУ и массовый расход i -й компоненты, поглощенной и отведенной с фильтрующей

водой из установки M_i''' , рассчитываются как

$$M_i'' = M_i'(1 - P), \quad (5.15)$$

$$M_i''' = M_i' - M_i''. \quad (5.16)$$

Критерием проверки правильности расчета материального баланса является классическое требование равенства суммы масс i -х компонент на входе и выходе в установку плюс масса, поглощенная фильтрующей водой в ходе очистки газов.

5.1.4. Четвертый этап – оценка выбросов выхлопных газов в окружающее пространство.

Исходными данными на этом этапе являются:

- высота судовой дымовой трубы H ;
- разность величины температуры выхлопных газов на выходе из судового дымохода и окружающей среды, ΔT ;
- расход выхлопных газов на выходе из судовой дымовой трубы, $Q_{\text{д.м}}$;
- величины фоновой и предельно допустимой концентрации i -й компоненты вредных веществ: C_{ϕ}^i , и $(\text{ПДК})_i$.

Максимальное значение приземной концентрации i -й компоненты вредных веществ C_m^i (мг/м³) после выброса судовых выхлопных газов при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии L_m (м) от судна определяется как [104]

$$C_m^i = \frac{A_t Q_{\text{в.в.}} \Psi k_1 k_2 \vartheta}{H^{\frac{2}{3}} \sqrt{Q_{\text{д.м.}} \Delta T}}, \quad (5.17)$$

где A_t – коэффициент, учитывающий температурную стратификацию атмосферы ($A_t \in [180; 200]$); ψ – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания

вредных веществ в окружающем пространстве; k_1 и k_2 – коэффициенты, учитывающие условия выброса выхлопных газов; H – высота дымовой трубы судна над уровнем воды, м; ϑ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа дна (при перепаде высот менее 50 м на 1 км, $\vartheta = 1$); ΔT – разность между температурами выбрасываемых выхлопных газов и окружающей среды, °С; $Q_{d.m.}$ – расход выхлопных газов на выходе из судовой дымовой трубы, м³/с.

При проведении расчетов коэффициент ψ может принимать следующие значения:

- для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей (пыль, зола) с нулевой скоростью упорядоченного оседания $\psi = 1$;
- для мелкодисперсных аэрозолей при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов не менее 90 % $\psi = 2$;
- для мелкодисперсных аэрозолей при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов от 75 до 90 % $\psi = 2,5$;
- для мелкодисперсных аэрозолей при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов менее 75 % и при отсутствии очистки $\psi = 3$.

Коэффициенты k_1 и k_2 рассчитываются следующим образом [101]:

$$k_1 = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}}, \quad (5.18)$$

$$k_2 = 0,532M_{г.з.}^2 - 2,13M_{г.з.} + 3,13. \quad (5.19)$$

Выражение (5.18) справедливо при $f < 100$, а величина f определяется как [101]

$$f = 1000 \frac{V_{г.з.}^2 D}{H^2 \Delta T}. \quad (5.20)$$

Выражение (5.19) справедливо, когда величина массы $M_{в.г.}$ уходящих судовых выхлопных газов находится в диапазоне $0,5 < M_{в.г.} < 2$. При этом величина $M_{в.г.}$ находится следующим образом [101]:

$$M_{в.г.} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{Q_{в.г.} \Delta T}{H}}. \quad (5.21)$$

Расстояние L_m от судовой дымовой трубы, на котором приземная концентрация i -й компоненты вредных выбросов, при неблагоприятных метеорологических условиях, достигнет своего максимального значения C_m (мг/м³), определяется как

$$L_m = \frac{5 - \psi}{4} k_3 H, \quad (5.22)$$

где безразмерный коэффициент k_3 при $f < 100$ и $0,5 < M_{в.г.} < 2$ рассчитывается по выражению

$$k_3 = 4,95 M_{в.г.} \left(1 + 0,28 \sqrt[3]{f}\right). \quad (5.23)$$

Вдоль водной поверхности распределение концентрации i -й компоненты вредных веществ C^i (мг/м³) по оси симметрии ближнего следа выбрасываемых выхлопных газов на различных расстояниях l от судовой дымовой трубы рассчитывается по выражению [104]

$$C^i = k_4 C_m^i, \quad (5.24)$$

где k_4 – безразмерный коэффициент.

Величина k_4 в зависимости от отношения l/L_m может быть найдена следующим

образом [104]:

$$\text{при } \frac{l}{L_m} \leq 1 \quad k_4 = 3\left(\frac{l}{L_m}\right)^4 - 8\left(\frac{l}{L_m}\right)^3 + 6\left(\frac{l}{L_m}\right)^2,$$

$$\text{при } 1 < \frac{l}{L_m} \leq 8 \quad k_4 = \frac{1,13}{0,13\left(\frac{l}{L_m}\right)^2 + 1}.$$

Величину l , определяющую расстояние до судна от места выпадения осадка, при проведении вычислений следует принимать равной: 50, 100, 200, 400 и 1000 м.

Значение предельно допустимого выброса (ПДВ) i -й компоненты вредного вещества с учетом предельно допустимой концентрации (ПДК) для судов при фоновой концентрации C_ϕ^i определяется как [104]:

$$\text{ПДВ}^i = \frac{(\text{ПДК}^i - C_\phi^i) H^2}{A_i \Psi k_1 k_2 \vartheta} \sqrt[3]{Q_{\text{д.з.}} \Delta T}. \quad (5.25)$$

Сопоставление результатов, получаемых на основании приведенной методики конструкторского расчета судового ФОУ выхлопных газов с реальными результатами натурных исследований показало наличие погрешности менее 4,7 %. Это значение можно считать приемлемым для проведения инженерных оценок процесса обработки выхлопных газов в условиях эксплуатации судна.

К основному достоинству разработанной методики конструкторского расчета можно отнести:

– возможность однозначного задания или изменения всех основных параметров, влияющих на процесс очистки судовых выхлопных газов;

- создание оптимальных рабочих условий для полной очистки выхлопных газов от вредных компонент;
- охлаждение выбрасываемых из судовой дымовой трубы судовых выхлопных газов до конкретно заданных значений, которые полностью обусловлены действующей на судне технологической схемой судовой энергетической установки.

5.2. Техничко-эксплуатационные требования к автоматизации ФОР, разработка и экспериментальная проверка качества управления процессом фильтрации и охлаждения выхлопных газов судового дизеля

Для обеспечения эффективности процесса очистки выхлопных газов при непрерывной эксплуатации СЭУ необходим постоянный контроль и поддержание ряда важнейших технологических параметров. К ним относятся:

- температура выхлопных газов на входе и выходе из ФОР;
- температура воды в фильтрационных элементах;
- парциальный (на один фильтро-охлаждающий элемент) и общий расход выхлопных газов;
- уровень воды в фильтрационных элементах;
- степень загрязнения фильтрующей воды в элементах.

Численные значения перечисленных параметров, задаваемые на стадии первоначальной настройки системы управления, определяют принципы и законы управления процессом очистки.

Принцип работы судовой системы очистки выхлопных газов ступенчатый относительно работы фильтро-охлаждающих элементов, объединенных в ФОР, и зависит от нагрузки на дизель. Степень загрязнения основных элементов должна непрерывно контролироваться автоматически до достижения предельного значения степени загрязненности воды. После чего осуществляется последующее перенаправление потока выхлопных газов на резервные элементы. В отработавшем элементе происходит смена воды. После чего он готов новому циклу очистки.

Наиболее эффективным является непрерывная смена воды в рабочей части элемента, что позволяет осуществлять безостановочную очистку выхлопных газов и поддерживать на нужном уровне их температуру.

Система управления процессом фильтрации и охлаждения выхлопных газов должна осуществлять следующие функции [85]:

- контроль температуры и расхода выхлопных газов;
- контроль температуры, степени загрязнения и уровня фильтрационной воды в работающих водяных кассетах;
- контроль утечки выхлопных газов в выхлопной системе судовой энергетической установки;
- управление подачей потока выхлопных газов на основные и резервные фильтрационные элементы;
- подачу воды в фильтрационные элементы при проведении их регенерации и заполнении рабочего объема;
- дренаж воды из фильтро-охлаждающих элементов при их загрязнении выше установленного предела;
- индикацию всех рабочих параметров процесса фильтрации и охлаждения выхлопных газов в режиме реального времени;
- индикацию аварийных состояний системы фильтрации и охлаждения судовых выхлопных газов;
- переход системы фильтрации и охлаждения судовых выхлопных газов на ручной режим управления.

Структурная схема системы автоматического управления судовой ФOU выхлопных газов предложенная автором и реализуемая компанией Emerson представлена на рис 5.1.

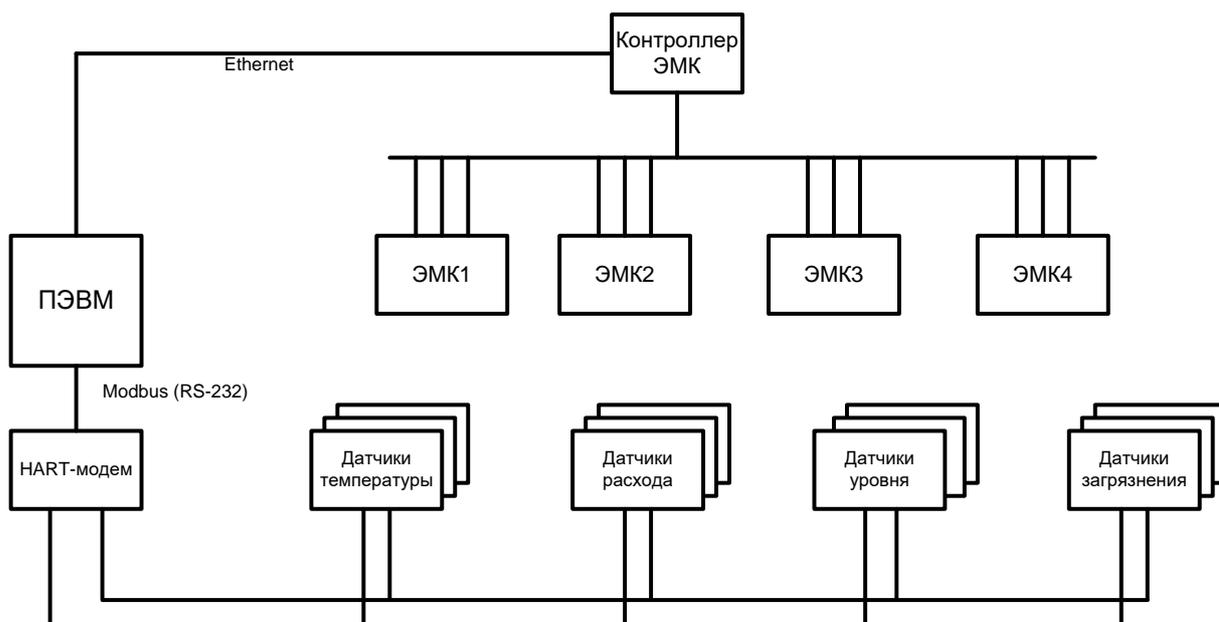


Рис. 5.1. Структурная схема системы автоматического управления ФОУ

Для управления процессом очистки выхлопных газов в системе должна использоваться ПЭВМ с установленным программным обеспечением, например, система SCADA. Такое программное обеспечение позволяет визуализировать на специальном мониторе все процедуры управления ФОУ с учетом показаний всех приборов системы, контролирующих состояние процессов фильтрации и охлаждения в ее элементах [26].

Опрос датчиков системы предлагается осуществлять по промышленному протоколу HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol) [86]. Этот протокол позволяет обеспечить надежность, простоту настройки и установки начальных и предельных значений параметров датчиков. HART-протокол призван обеспечить высокую помехоустойчивость необходимую в условиях работы судна.

Для обеспечения высокого качества работы системы автоматизации все датчики, которые в ней используются должны иметь встроенный HART-интерфейс.

Для обеспечения преобразования аналоговых сигналов датчиков в цифровую форму, пригодную для обработки на ПЭВМ должен использоваться HART-модем. Он подключен к сети датчиков по двухпроводной линии, а к ПЭВМ по интерфейсу RS-

232. Для объединения датчиков и ПЭВМ в единую информационную сеть могут также использоваться и беспроводные технологии [75].

При проведении производственных исследований по качеству управления фильтрационными элементами, две из которых находились в рабочем режиме, а две оставшиеся использовались, как резервные – в режиме ожидания, дополнительно использовался контроллер электромагнитных клапанов ЭМК1-4 (см. рис. 5.1). Процесс управления происходил по внутренней мультиплексированной шине. Управляющая информация поступала в контроллер электромагнитных клапанов от ПЭВМ по проводной сети Ethernet. Каждый фильтрационный элемент управлялся тремя электромагнитными клапанами: рабочим – для подачи выхлопных газов, впускным – для заполнения элемента водой и выпускным – для очистки элемента при превышении заранее заданной степени загрязненности воды.

Для контроля за изменением основных параметров процесса фильтрации и охлаждения выхлопных газов были установлены следующие диапазоны изменения основных величин:

– температурный диапазон для выхлопных газов на входе в ФОУ:
 $T_1 = 120-150 \text{ }^\circ\text{C}$;

– температурный диапазон для выхлопных газов на выходе из ФОУ:
 $T_2 = 60-90 \text{ }^\circ\text{C}$.

Выход за нижнюю границу температуры T_1 должен сигнализировать о возможной разгерметизации и утечке выхлопных газов в выхлопной линии системы судовой энергетической установки.

Выходная температура T_2 используется, как управляющий параметр для дискретного управления числом одновременно работающих фильтро-охлаждающих элементов: при ее малом значении возможно включение в контур обработки только одного элемента, а с повышением T_2 осуществляется ступенчатое включение в процесс очистки всех элементов.

Значения допустимых уровней объемного расхода выхлопных газов, объема воды в элементах и степени ее загрязненности являются варьируемыми параметрами, которые зависят от степени технического совершенства и состояния судовой энергетической установки. Эти величины должны определяться конкретно для каждого судна при проведении пуско-наладочных работ и настройке системы автоматического управления.

Разработанный автором алгоритм работы судовой системы управления процессом фильтрации-охлаждения выхлопных газов в упрощенном виде приведен на рис. 5.2.

Процедура начальной установки включает в себя проверку работоспособности всех узлов системы управления и установку начальных условий для последующей работы фильтро-охлаждающих элементов. Закон управления ФОРУ описывается сложной эмпирической функцией вида

$$F = f(x_i, T_1, Q_1, T_2, l_i), \quad (5.26)$$

где x_i – состояние рабочих клапанов фильтро-охлаждающих элементов ($i = 1..4$); Q_1 – расход газов, подаваемых на очистку; l_i – уровень воды в i -м элементе.

Уточнение вида зависимости (5.26) осуществляется при тестовых испытаниях в конкретных условиях эксплуатации ФОРУ выхлопных газов. Уточненные значения параметров и коэффициентов заносятся в базу данных программы управления ФОРУ.

Изменение конфигурации ФОРУ, включающей в себя основные и резервные элементы, может происходить в следующих случаях:

- при превышении заданной температуры выхлопных газов (120 °С) на выходе из ФОРУ;
- при превышении уровня температуры воды в фильтрационных элементах;
- при превышении заранее заданного допустимого уровня загрязненности фильтрующей воды.

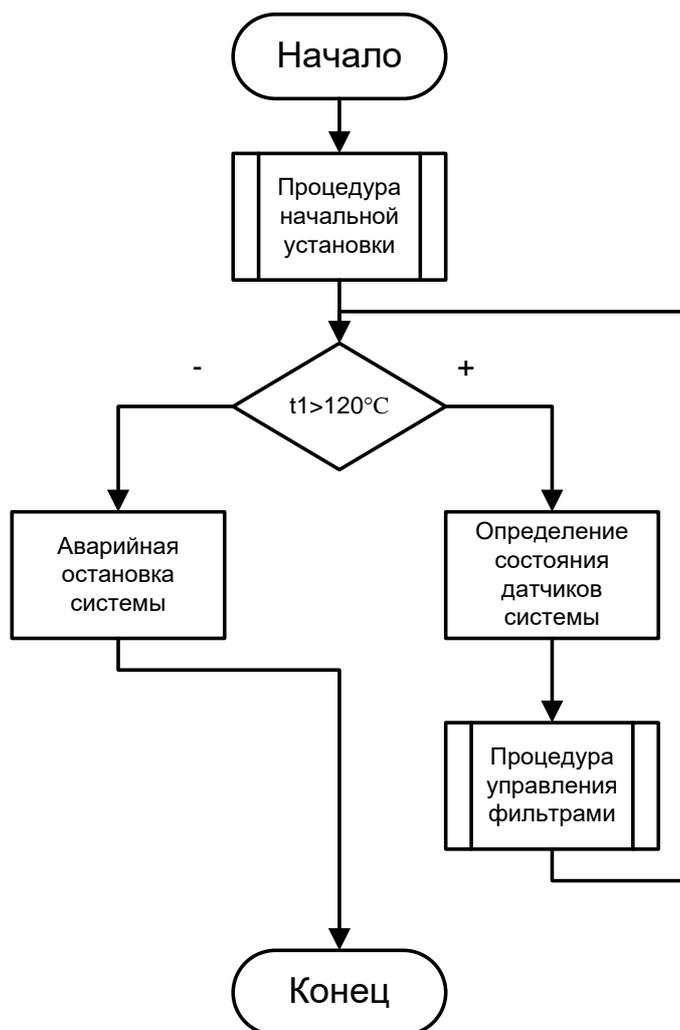


Рис. 5.2. Схема алгоритма работы системы управления ФОУ

Если загрязненность воды превышает величину 20% от первоначального состояния, производится автоматическое отключение и регенерация элемента путем дренажа загрязненной воды и последующей подачи чистой воды до установленного датчиком уровня.

В случае, если при работе всех контуров фильтрации параметры системы выходят за допустимые пределы, система автоматически переводится в аварийный режим. При индикации аварийного режима следует перевести систему фильтрации и охлаждения выхлопных газов в режим ручного управления или отключить, а в отдельных случаях остановить главный двигатель или перевести его на частичную нагрузку.

5.3. Техничко-эксплуатационные требования к конструкции фильтро-охлаждающей установки

Общие требования к материалам, используемым при изготовлении судовой ФОР выхлопных газов, являются стандартными по отношению к эксплуатирующимся теплообменным аппаратам и установкам. Все материалы ФОР должны обладать теплостойкостью и устойчивостью к механическим и вибрационным нагрузкам, окислению, коррозии и другим дополнительным факторам.

Особыми в этом смысле являются вспомогательные газоходы. Использование неметаллических каналов для подвода и отвода выхлопных газов к фильтрационным элементам должно быть полностью исключено.

При прохождении выхлопных газов через водяные фильтрационные элементы за счет присутствия NO_2 в них будет образовываться слабый раствор азотной кислоты HNO_3 , что помимо положительного эффекта очистки газов приведет к корродированию рабочих поверхностей фильтро-охлаждающего элемента, а высокая температура рабочего тела внутри элемента способствует ускорению утраты его работоспособности.

Для предотвращения преждевременной разгерметизации корпуса элемента все поверхности рабочей части и направляющих пластин на этапе изготовления должны быть покрыты защитным слоем. Таким защитными материалами могут быть двух- и многокомпонентные эпоксидные смолы, полиуритан, фурамные смолы, и фенолформальдегидные материалы. В зависимости от предельного температурного режима эксплуатации их относят к термореактивным материалам, с предельной температурой эксплуатации 200-250 °С, выше которой происходит их обугливание, и термопластичные материалы с предельной температурой эксплуатации 160 – 180 °С, выше которой они начинают изменять свои рабочие характеристики (резко падает ударная вязкость).

Наиболее коррозиестойкими продуктам реакции выхлопных газов дизелей являются эпоксидные смолы и фенолформальдегидные материалы.

Более дорогостоящей является листовая кислотостойкая нержавеющая хромистая сталь или хромоникелевая сталь марок от 12X18Н9 до 10X14Г14НЗ. К зарубежным аналогам относится тип AISI316L.

Для изготовления сменных направляющих пластин (но не корпуса) фильтро-охлаждающего элемента пористую металлокерамику с покрытием на основе никеля и алюминия [53].

Согласно существующим нормативным требованиям [61] температура внешней поверхности корпуса теплового судового оборудования, к которой прикасается оператор во время нормальной эксплуатации, не должна превышать температуру окружающей среды более, чем на 20 °С.

В качестве изоляционного материала наружной поверхности фильтро-охлаждающего элемента, газоходов и трубопроводов рекомендуется следующие наименования покрытий (табл. 5.2).

5.4. Особенности технологических операций по изготовлению и монтажу судовой фильтро-охлаждающей установки

К основным технологическим операциям, выполняемым при изготовлении и монтаже ФОРУ относятся следующие:

- изготовление корпуса фильтро-охлаждающего элемента;
- монтаж направляющих пластин внутри рабочей части;
- подключение к выхлопному тракту судового дизеля (дизелей);
- монтаж вспомогательного оборудования и арматуры;
- монтаж контрольно-измерительной аппаратуры и сигнализации.

Таблица 5.2

**Перечень материалов для теплоизоляции корпуса
фильтро-охлаждающего элемента и газоходов**

| Название материала | Коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ |
|--------------------------|---|
| Изолон | 0,031 |
| Пенополиуретановые листы | 0,035 |
| Пенопласт ПС-1 | 0,037 |
| Пенопласт ПС-4 | 0,04 |
| Пенополистирол ПС-Б | 0,04 |
| Пенополистирол ПС-БС | 0,04 |
| Поролон | 0,04 |
| Вата минеральная легкая | 0,045 |
| Пенопласт резопен ФРП | 0,045 |
| Пенопласт ПХВ-1 | 0,05 |
| Стекловата | 0,05 |

При изготовлении корпуса фильтро-охлаждающего элемента следует учитывать специфику процесса очистки выхлопных газов. Стенки и дно корпуса должны изготавливаться из цельнометаллической листовой стали. При квадратной форме поперечного сечения рабочей части, достигается полная герметичность корпуса путем использования болтовых соединений. При сборке четырех стенок корпуса между ними в качестве уплотнителя рекомендуется использовать резиновые прокладки (толщина 2-3 мм). Как показано на рис. 5.3 соединение двух граней корпуса должно выполняться “внахлест”.

Перед сборкой все листы корпуса и направляющих пластин должны быть равномерно покрыты слоем эпоксидной смолы (толщина 3-4 мм). Те части поверхности кромок корпуса, которые соприкасаются между собой в местах соединения, слоем нейтрального вещества покрываться не должны.

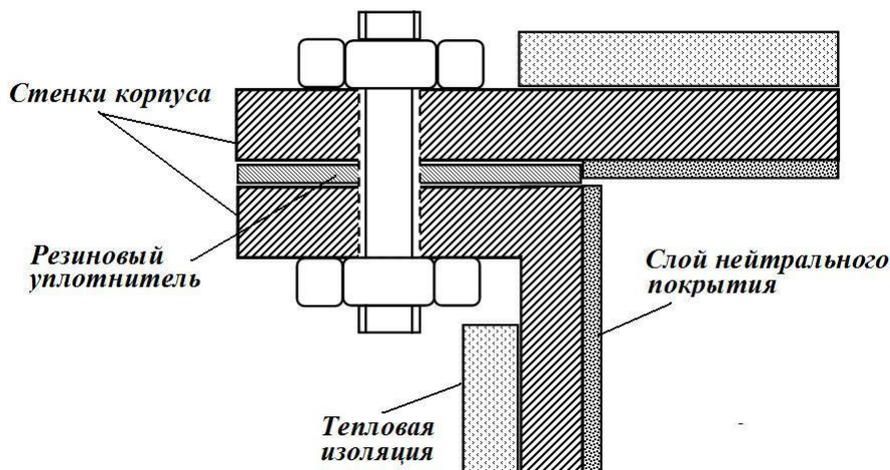


Рис. 5.3. Соединение стенок корпуса фильтрационной камеры

Тепловая изоляция вне зависимости от ее эластичности (изолон – гнущийся, а пенопласт – жесткий материал) должна допускать возможность быстрой замены. По этой причине допускается использование точечного склеивания материала изолятора с корпусом фильтро-охлаждающего элемента. В силу невозможности обеспечить плотное прилегание поверхностей корпуса и изолятора, а также хрупкости большинства теплоизоляционных материалов механическое крепление должно быть исключено.

Каждая из направляющих пластин внутри рабочей камеры при движении потока выхлопных газов будет испытывать гидродинамическую нагрузку. При суммарной площади поверхности пластин равной S оценкой порядка нагрузки является отношение $P_{вх}/S$ (см. выражение 5.12). С ростом периода эксплуатации ФОУ за счет этой нагрузки и корроирования материала пространственное положение пластин может изменяться. Для предотвращения такого разрушения, а также с целью изначального качественного монтажа пластин необходимо внутри рабочей части элемента по оси симметрии установить цилиндрический стержень с резьбовым соединением.

Как показано на рис. 5.4, подкручивание гайки под пластиной с использованием угломера позволит выставить необходимый монтажный угол в 30 градусов. Верхняя фиксация направляющих пластин не требуется, поскольку сила тяжести, вызываемая

весом пластины, будет всегда заведомо превышать подъемную силу, возникающую от гидродинамических нагрузок на ее поверхность.

При проведении монтажных работ в нижней части рабочей камеры местом крепления стержня является резьбовое отверстие, выполненное непосредственно в направляющей решетке для генерирования пузырьков выхлопных газов необходимого размера.

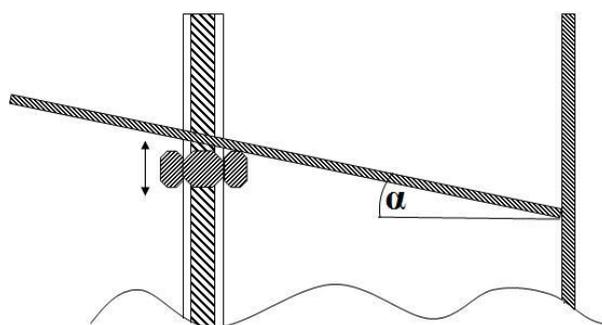


Рис. 5.4. Схема установки пространственного положения направляющих пластин внутри фильтрационной кассеты

Верхнее крепление направляющего стержня находится на каплеуловительной решетке (см. рис. 4.2). В ее центральной части на нижней планке должно быть выполнено отверстие, в которое при монтаже и закладывается стержень.

Монтаж ребер на стенках корпуса должен осуществляться при помощи болтового соединения. В этом случае к стенкам корпуса приваривается Г-образный профиль с размерами граней не более 10 мм. Направляющие пластины присоединяются к его горизонтальной поверхности по аналогии с соединением граней корпуса (см. рис. 5.3).

Для интенсификации процесса очистки выхлопных газов необходимо их интенсивное перемешивание с водой. В этом случае при монтаже установки требуется обеспечение оптимального распределения газовых пузырьков по сечению элемента. При изготовлении раздаточной линии для ввода выхлопных газов в судовую ФОУ необходимо правильно выбирать размер входных отверстий. Диаметр

отверстия должен соответствовать известным рабочим характеристикам запыленности (зольности) потока, требуемой степени снижения выбросов NO_x и SO_x и заранее измеренному или рассчитанному гидравлическому сопротивлению фильтро-охлаждающего элемента по ранее предложенной методике.

Раздаточная решетка должна выполняться в виде двух параллельных пластин. Как показано на рис. 5.5, нижняя пластина предназначена для соединения с каналом подачи судовых выхлопных газов и их равномерного распределения по всей нижней плоскости рабочей камеры фильтро-охлаждающего элемента. Верхняя решетка выполняет роль генератора выхлопных пузырьков одинакового размера.

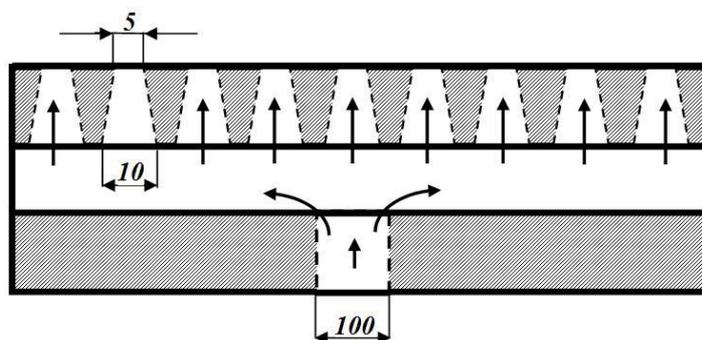


Рис. 5.5. Раздаточная решетка фильтро-охлаждающего элемента

Все отверстия верхней решетки высверливаются с идентичными диаметрами и на одинаковых расстояниях друг от друга. Каналы на верхней пластине для входа газов в установку выполнены в виде конусного сопла. Технология изготовления входного и выходного диаметров отверстий осуществляется путем начального использования меньшего сверла, а затем использованием сверла, размер которого совпадает со входным диаметром.

Рабочая камера ФОУ выхлопных газов должна присоединяться к стационарным судовым дымоходам таким образом, чтобы был обеспечен беспрепятственный доступ для технического обслуживания ее внутренних и наружных рабочих поверхностей. В этом случае с точки зрения простоты монтажа наиболее рациональным является использование фланцевых соединений. Этот вид соединения позволяет полностью

обеспечивать соосность монтируемых секций и допускает возможность локальной замены необходимых участков установки.

После окончательного монтажа всех фильтро-охлаждающих элементов их необходимо проверить на герметичность соединения. Во время судовых пуско-наладочных испытаний эта операция может выполняться с использованием повышенного гидростатического давления. В этом случае необходимо заполнить фильтро-охлаждающий элемент водой и перекрыть все клапаны на линиях, обеспечивающих движение судовых выхлопных газов и на линии сброса воды. Тестовое давление должно быть больше рабочего давления в установке на 30-35 % и выдерживаться на протяжении не менее двух часов.

Для обеспечения непрерывности процесса обработки выхлопных газов необходимо:

- с целью снижения концентрации механических взвесей в потоке на линии ввода выхлопных газов установить золоулавливающее устройство (решетчатого или центробежного типа);

- с целью создания давления ниже атмосферного, необходимо установить вентилятор для отбора обработанных судовых выхлопных газов.

- с целью визуального контроля за процессами фильтрации и охлаждения установить на каждой фильтро-охлаждающем элементе смотровое окно из высокотемпературного стекла с металлической заслонкой, покрытой снаружи слоем теплоизолирующего материала.

Для эффективного отделения оксидов азота (NO_x) от выхлопных газов следует обеспечить частую замену воды. В случае, если выхлопные газы характеризуются высоким содержанием оксидов серы (SO_x), характеризующихся меньшей растворимостью, целесообразно использовать озонированную воду (обладает высокой стоимостью процесса получения) или добавлять в воду щелочные растворы на основе NaOH или $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

5.5. Общие требования к эксплуатации и управлению фильтро-охлаждающей установкой

Эффективность процесса очистки выхлопных газов зависит от вязкости газовой смеси в ФОЭ, доминирующее значение в которой принадлежит вязкости воды. Поскольку вязкость обратно пропорциональна температуре воды, то повышение температуры фильтрующей воды негативно сказывается на рабочем процессе, так как при падении вязкости воды будет наблюдаться повышение скорости всплывания выхлопных газов, уменьшение времени контактного взаимодействия пузырьков выхлопных газов с водой, и, как следствие, снижение производительности установки.

Для обеспечения продолжительной работы ФОУ необходим правильный выбор места ее включения в соответствующий контур судовой энергетической установки. Рассматриваются две схемы подключения:

- непосредственно за турбоагрегатом;
- за утилизационным котлом.

Схемы подключения ФОУ из-за неадекватности состояния выхлопных газов на входе имеют некоторые отличия. Первая схема характеризуется наличием большей концентрации механических взвесей в газовом потоке и, следовательно, дает большую нагрузку на фильтро-охлаждающий элемент, заведомо снижая эффективность отбора SO_x и NO_x . Для понижения температуры выхлопных газов на выходе ФОУ требуется дополнительная установка рекуперативного теплообменного аппарата (трубчатого теплообменника, набора тепловых труб и т.п.).

Вторая схема подключения ФОУ эффективнее, поскольку температура выхлопных газов, подаваемых на очистку, будет значительно ниже, чем в предыдущем варианте, и часть примесей в виде летучей золы будет предварительно задерживаться в утилизационном котле. Продолжительность эксплуатации фильтро-охлаждающих элементов и степень абразивного износа их рабочих поверхностей будет значительно отличаться по эффективности в пользу второй схемы подключения (рис. 5.7).

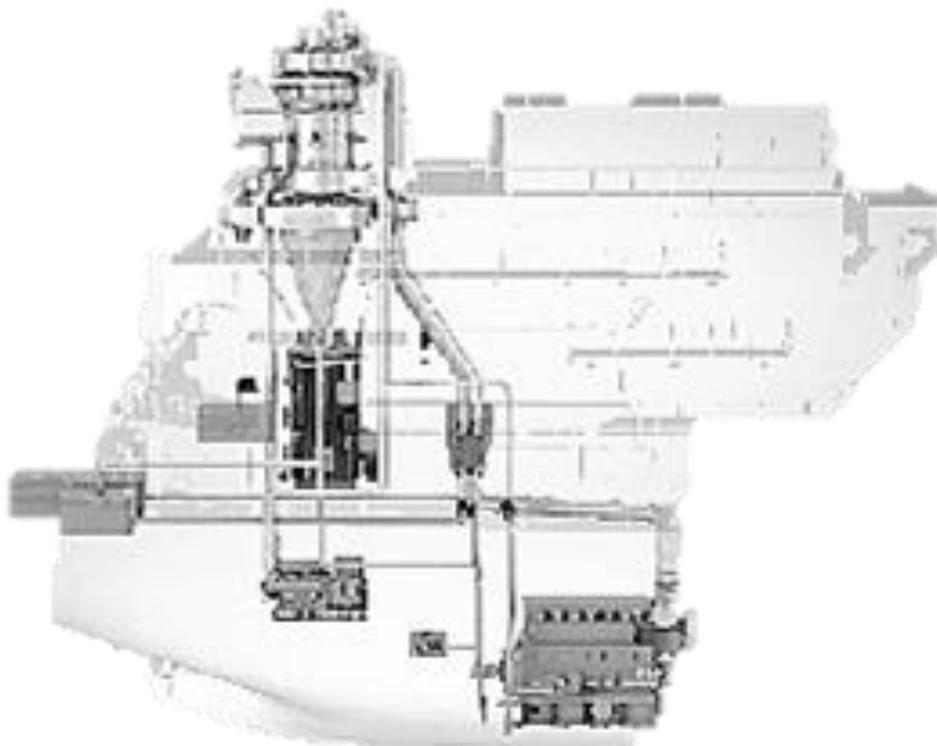


Рис. 5.7. Разработная ФОУ в составе судового технологического контура

После выбора технологической схемы подключения эксплуатация ФОУ выхлопных газов должна производиться по принципу попеременного использования набора фильтро-охлаждающих элементов.

Разработанная и запатентованная автором (см. Приложение Б) эксплуатационная схема судовой ФОУ имеет общее гидравлическое соединение всех элементов представляет собой замкнутый контур (рис. 5.8). Каждый составляющий трубопровод с фильтро-охлаждающим элементом может работать как самостоятельно, так и параллельно с другими.

Для работы СЭУ в эксплуатационном режиме предусмотрено одновременное использование двух фильтро-охлаждающих элементов. При этом выхлопные газы, которые подаются на очистку из общего судового газохода 1 направляются по отдельным газоходам в фильтро-охлаждающие элементы 3.

На каждой линии установлены управляемые невозвратные клапаны 2 для обеспечения изоляции фильтро-охлаждающих элементов. Также, клапаны 2, предотвращают утечки фильтрующей воды. На выходе из фильтро-охлаждающих

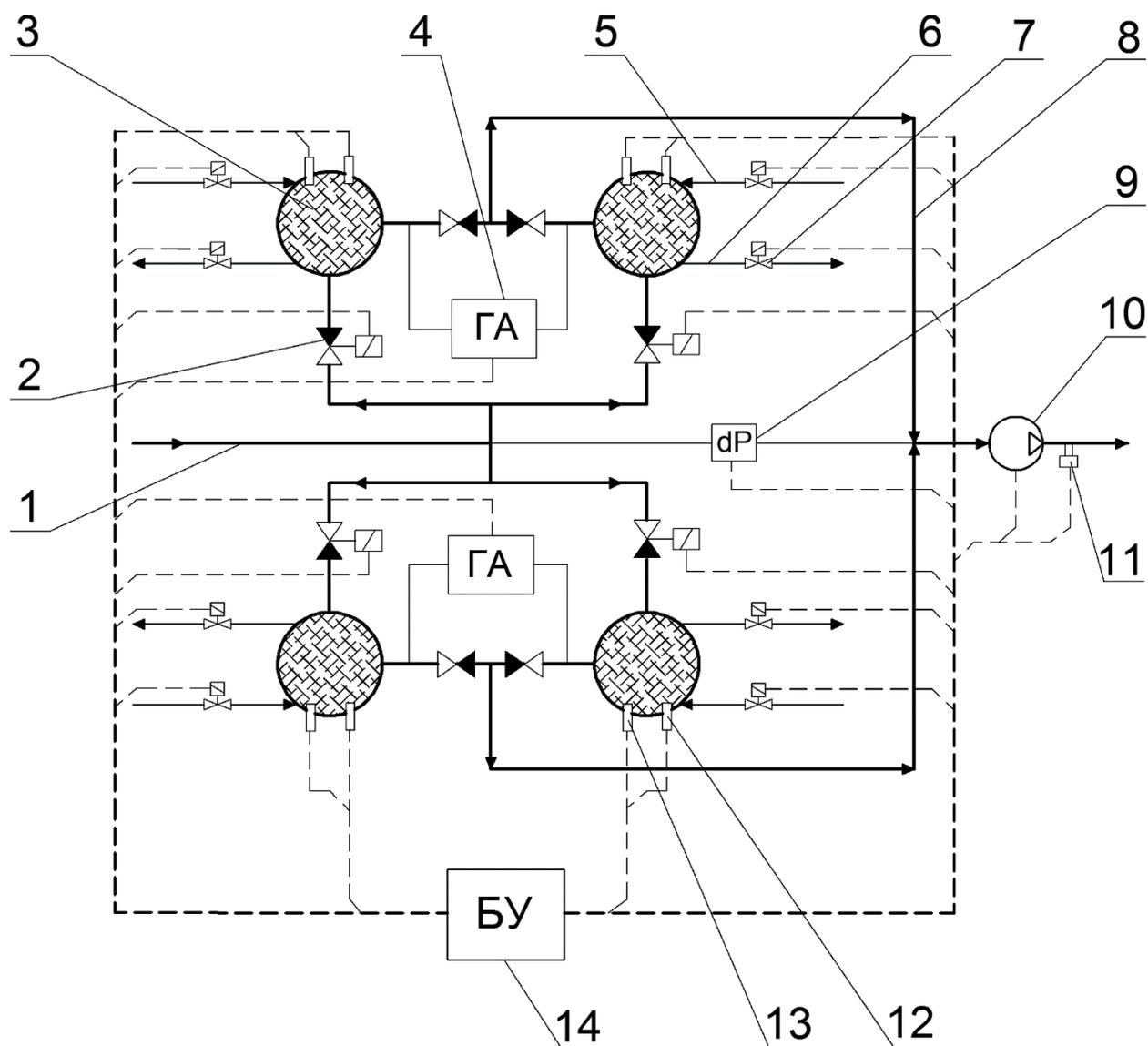


Рис. 5.8. Эксплуатационная схема работы судовой ФОУ выхлопных газов дизеля

элементов происходит контроль чистоты газов с помощью газоанализатора 4. Вода подводится и отводится по трубам 5 и 6, соответственно. Этот процесс осуществляется с помощью управляемых клапанов 7. По высоте фильтро-охлаждающего элемента температура и концентрация вредных примесей в выхлопных газах будет уменьшаться, достигая своего минимума на выходе из узла обработки. Полностью очищенные и охлажденные выхлопные газы отводятся по линиям 8. Между линиями 1 и 8 установлен дифференциальный измеритель давления 9. С целью интенсификации процесса отвода на выходе ФОУ установлен вентилятор 10. Температура газов на выходе контролируется датчиком температуры 11. Для

контроля за уровнем воды в фильтро-охлаждающем элементе ее температурой установлены соответствующие датчики 12 и 13. Блок управления 14 предназначен для реализации, описанной выше функции управления (5.26).

Достоинством предлагаемой технологической схемы является ее универсальность: при необходимости изменение производительности в большую или меньшую сторону достигается изменением числа работающих фильтро-охлаждающих элементов.

Для удаления растворенных газов из фильтрующей воды не работающие элементы должны из режима повышенного давления переводиться в нормальный режим регенерации при барометрическом давлении. В этом случае согласно закону Генри [4]

$$\frac{W_г}{W_{жс}} = k \frac{P_{жс}}{P_a}, \quad (5.26)$$

где $W_г$ – объем растворенного в жидкости газа, $W_{жс}$ – объем жидкости, k – коэффициент растворимости газов, $P_{жс}$ – давление в жидкости, P_a – атмосферное давление.

При снижении давления до величины атмосферного весь избыточный объем растворенных в воде газов будет удаляться через ее свободную поверхность в количестве

При снижении давления до величины атмосферного весь избыточный объем растворенных в воде газов будет удаляться через ее свободную поверхность в количестве

Увеличение гидростатического давления может также приводить к уменьшению времени исчезновения газовых пузырьков в воде. Согласно экспериментальным данным работы [59] увеличение гидростатического давления приводит к заметному увеличению схлопывания пузырьков, а затем к некоторому уменьшению с выраженным оптимумом.

При работе ФОЭ из-за наличия конструктивно создаваемых в движущемся потоке газа вихревых областей будет наблюдаться рост массы частиц механических примесей и их скопление в угловых зонах, образованных корпусом фильтро-охлаждающего элемента и поверхностью пластин. По этой причине необходимо предусмотреть их удаление.

При выводе ФОЭ из рабочего процесса в нем происходит процесс промывки всех рабочих поверхностей. Для создания процесса интенсивного вихреобразования скорость промывочной воды должна быть не менее 6-7 м/с, а сам процесс очистки должен контролироваться по степени загрязненности воды. Турбулизация потока обеспечивается варьированием расхода, который за счет слаженной работы системы автоматически управляемых клапанов на 1-2 секунды должен падать до нулевого значения, а затем на протяжении 30-60 секунд оставаться неизменно максимальным.

Для отбора тепла от уходящих выхлопных газов требуется управляемый съём тепла на линии воды ФОЭ.

5.6. Выводы по разделу 5

Математическая модель оптимизации процесса очистки выхлопных газов определяет режимные и конструктивные параметры ФОУ при достижении максимума ее фильтрующей способности (5.13), представляющее произведение ее объёмного расхода газов, числа используемых ФОЭ, концентрация газовой компоненты на входе в ФОЭ, а также коэффициентов развитости поверхности контакта сред и чистоты воды, которая проверяется экспериментально при проведении очередных испытаний и проверок работы ФОЭ.

Составленная методика расчета ФОУ предполагает выполнение четырех этапов: расчет входных характеристик потока выхлопных газов; определение геометрических размеров рабочей камеры установки; расчет материального баланса судовых выхлопных газов при их очистке; экологическую оценку последствий выбросов выхлопных газов в окружающее пространство.

По сравнению с одиночным пузырьком, при всплывании группы пузырьков выхлопных газов время их нахождения в ФОЭ становится более продолжительным.

Объем фильтрующей воды должен быть меньше объема рабочей камеры ФОЭ на 15 %.

Повышение температуры фильтрующей воды негативно сказывается на качестве очистки газов, так как за счет падения вязкости воды повышается скорость всплытия пузырьков выхлопных газов, уменьшается время их контактного взаимодействия и, как следствие, снижается производительность ФОУ.

Автоматическое управление процессом очистки и охлаждения выхлопных газов обеспечивает эффективность и надежность эксплуатации ФОУ.

Рабочие поверхности ФОЭ для защиты от кислотной коррозии выполняются из листовой кислотостойкой нержавеющей хромистой стали или хромоникелевой стали, покрытой со стороны выхлопных газов слоем двухкомпонентной эпоксидной смолы, а с наружной стороны – слоем теплоизоляции (изолоном или пенопластом).

Принцип работы ФОУ – ступенчатый, реализуемый дискретным включением в работу ФОЭ в зависимости от скорости газов на входе ФОУ.

Теплосъем от выхлопных газов обеспечивается фильтрующей водой, температура которой контролируется непрерывно.

Процесс регенерации объема фильтрующей воды осуществляется циклической добавкой свежих порций программно: 20-30 минут очистка и 2-3 минуты регенерация с пополнением новой порцией воды.

Основные результаты раздела 5 представлены в работах автора [16, 17, 25].

ВЫВОДЫ

Диссертационное исследование содержит теоретическое обобщение и новое решение актуальной научно-практической задачи создания принципа функционирования фильтро-охлаждающей установки путем усовершенствования процессов фильтрации и охлаждения отработанных выхлопных газов судового дизеля. Острая проблема экологического загрязнения окружающей среды вредными и токсичными составляющими судовых продуктов сгорания топлива на момент начала исследования оставалась нерешенной, поскольку ни одна из существующих судовых технологических схем утилизации отходящих выхлопных газов не предусматривала в своем технологическом контуре систему их очистки.

Совершенствование очистки выхлопных газов обеспечивается за счет унификации и интенсификации процессов фильтрации и охлаждения газового потока путем межфазного контактного взаимодействия в барботирующем слое воды.

Разработана математическая модель процессов охлаждения и фильтрации полностью воспроизводит количественный взаимосвязь между взаимодействующими веществами в системе «газ-вода», что позволило определить необходимые условия для максимальной интенсификации тепломассообмена. Адекватность модели зависит от выбранного метода численного решения уравнений в частных производных. Использованный в исследовании метод конечных элементов показал хорошее согласование с экспериментом, поскольку относительная погрешность моделирования не превышала 4,7%.

Уменьшение концентрации вредных соединений NO_x на 99,7%, SO_x на 97,7% и тепловой нагрузки на 30% осуществляется дискретным изменением площади контактного взаимодействия газов с водой в герметичном ФОЭ в диапазоне объемного расхода газов 2-5 м³/с. Для увеличения площади контакта предложено новое конструктивное решение по установке направляющих пластин под углом 30° на стенках рабочей камеры ФОЭ, за счет чего вдвое время контактного взаимодействия увеличивается в 1,5 раза, и распределительной решетки с

отверстиями, размер которых обеспечивает генерирование пузырьков необходимого диаметра в 5 мм.

Эксплуатация судового узла обработки ВГ должна проводиться по принципу последовательного использования набора фильтро-охлаждающих элементов, что связано с необходимостью утилизации тепла и накопленной твердой фазы в фильтрационной воде. Изменение производительности в большую или меньшую сторону должно достигаться изменением количества одновременно работающих ФОЭ.

Разработана методика тепломассообменного расчета, конструирования, изготовления и испытания фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов, которая учитывает все эксплуатационные параметры судового дизеля, что позволяет непосредственное интегрирование ФОУ в любой технологический контур.

Результаты исследования внедрении и используются в судоходной компании ТВ Marine Hamburg, что позволило снизить температуру судовых выхлопных газов, в среднем в 1,5 раза, а снижение выбросов SO_x при работе судна на топливе с высоким содержанием серы до показателей до уровня, отвечающего использованию топлива с низким содержанием серы, и в НУ «ОМА» при проведении лекционных занятий по дисциплинам оптимизация режимов работы судовых энергетических установок и техническая эксплуатация судовых энергетических установок и в НИР «Развитие современной теории и практики технической эксплуатации морского и речного флота: концепции, методы, технологии».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М., Мир, 1990. в 2 т.
2. Антонов, А. В. Системный анализ [Текст]: учеб. для вузов / А. В. Антонов – М.: Высш. шк., 2004. – 454 с.: ил.
3. Гришин Б., С. Андреев, Т. Малютина, Е. Савицкий. Кинетика процесса переноса кислорода воздуха при пневматической аэрации природных и сточных вод. Источник: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2009/kita/pilipenko/library/article2.htm>.
4. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы /Башта Т.М., Руднев С. С./ - М.: Изд-во Машиностроение, 1982. - 423 с.
5. Бернер Г. Я. Технология очистки газа за рубежом. Справочник. – М.: Изд-во “Новости теплоснабжения”, 2006. – 260 с.
6. Беспалов В. И. Технология осушения выхлопных газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров // Известия ТПУ. 2010. №4.
7. Брагинский Л.Н., Евилевич М.А. Моделирование аэрационных сооружений очистки сточных вод. М. Изд-во. Химия, 1980.
8. Всемирный 24-й конгресс двигателестроения для судовых пропульсивных установок, Энергоснабжение, Передача мощности – Япония, Киото, 2004.
9. В. В. Фарапонов, Н. В. Савкина, А. С. Дьячковский, А. В. Чупашев. Расчет аэродинамического коэффициента лобового сопротивления тела в дозвуковых и трансзвуковых режимах движения с помощью пакета ANSYS Fluent. Компьютерные исследования и моделирование. Модели в физике и технологии. 2012. Т. 4, No 4, С. 845–853.
10. Власенко В. М. Каталитическая очистка газов. Киев: Техника, 1973. 199 с.
11. Возницкий И. В. Практика использования морских топлив на судах – изд.4, испр. и доп., СПб.: 2006 – 124с.

12. Голиков В.А., Голубев М.В. Системный подход к решению задач повышения эффективности эксплуатации судовых энергетических установок / В.А. Голиков, М.В. Голубев // Судовые энергетические установки: научно технический сборник. Вып. 10. – Одесса: ОНМА, 2004. – С. 50-53.

13. Голиков В. А., Голубев М. В. Управление процессом фильтрации продуктов сгорания на судовых энергетических установках / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Одесса: Куприенко. – Сборник научных трудов SWorld, 2013. Т.2. – С.15-18.

14. Голиков В. А., Голубев М.В. Энергетическая эффективность судовых дизельных установок / В.А. Голиков, М.В. Голубев // Судовые энергетические установки: научно технический сборник. Вып. 12. – Одесса: ОНМА, 2005. – С. 66-75.

15. Голубев М. В. Исследование характерных процессов при обработке судовых выхлопных газов / М. В. Голубев // Проблемы техники: науково-виробничий журнал. – Одеса: ОНМУ, 2013. - №3. – С.133-141.

16. Голубев М. В. Совершенствование системы фильтрации уходящих газов на судовых дизельных установках / М.В. Голубев // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Машинобудування. – Київ: НТУУ ”КПІ”, 2013. – 68. – С.157-165.

17. Голубев М. В. Экспериментальное изучение процесса очистки судовых выхлопных газов от токсичных составляющих / М.В. Голубев // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Одесса: ОНМА, 2014. – № 31. – С.44–58.

18. Голубев, М. В. Современные проблемы технической безопасности судоходства [Текст] / М. В. Голубев // Proceedings of the International scientific-practical conference «Safety of shipping and human element», August 5-8, 2004. □ Odessa. □ P. 177-179;

19. Голубев, М. В. Математическая модель энергосберегающей системы СДУ [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали Міжнародної наук. конф. «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій (ISDMIT'2005)», 18-21 мая 2005 г. – Евпатория. – С. 23-25;

20. Голубев, М. В. Повышение экономической эффективности энергетических установок газозовов [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали Міжнародної наук. та наук.-

метод. конф. «Сучасні проблеми суднової енергетики – 2007», Одеса, 15-17 мая 2007 г. – С. 37-40;

21. Голубев, М. В. Судовая система очистки дымовых газов [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали XIV Міжнародної наук.-тех. конф. «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2013. – Севастополь. – С. 114-116;

22. Голубев, М. В. Модернизация судового контура обработки дымовых газов [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф. «Управління проектами в умовах транзитивної економіки», 13-14 грудня 2013 р. – Т. 2. – Одеса. – С. 57-58;

23. Голубев, М. В. Метод обработки дымовых газов в условиях работы судовой энергетической установки [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали 4-ї Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2013», 9-11 жовтня 2013 р. – Херсон. – С. 345-349;

24. Голубев, М. В. Экологическая нейтрализация токсичных примесей в дымовых газах [Текст] / М.В. Голубев // Матеріали 6-ї Міжнародна наук.-практ. конф. «Сучасні порти – проблеми та рішення». – Илличевск, 2014. – С.20-23;

25. Голиков В. А. Судовые технологические схемы очистки и регенерации тепла уходящих дымовых газов [Текст] / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Матеріали 5-ї Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2014», 1-3 жовтня 2014 р. – Херсон. – С.136-139.

26. Гурьянов Л. В. Проблемы выбора инструментальных средств построения SCADA-систем / Гурьянов Л. В., Прошин Д. И. // Информационные системы управления производством. №1/2010.

27. Евенко В., Гришкин В. «Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов» и их применение // Морской флот. – 2005. – № 5. – С. 54–61.

28. Европейский стандарт EN 13084-1:2007.

29. “Женевская Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния”, 13.11.1979 г.

30. Закон України “Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року”.

31. Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища”.

32. Закон України “Про охорону атмосферного повітря”.

33. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. Справочник в 2-х частях. Под ред. С. Калверта. - М.: Металлургия. – 1988. – 760 с.

34. Истомин, В. И. Анализ вредного воздействия СЭУ на окружающую среду [Текст] / В. И. Истомин, С. Е. Тверская, М.В. Истомин // Судовые энергетические установки: научно-техн. сборник ОНМА. – Вып. 16. – Одесса: Видавінформ, 2006. – С. 10-17.

35. Когановский А.М., Клименко Н.А. Физико-химические методы очистки промышленных сточных вод от поверхностно-активных веществ. — Киев: Наукова Думка, 1974.

36. Колегаев, М. А. Снижение выбросов с отработавшими газами дизелей (реферативный обзор) [Текст] / М. А. Колегаев, И. И. Черныш // Судовые энергетические установки: научно-техн. сборник ОГМА. – Вып. 5. – Одесса: Техносервис, 2000. – С. 45-50.

37. Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Original: ENGLISH November 2011. 45 сессия Рабочей группы по стратегиям и обзору. Руководящий документ по технологиям регулирования выбросов серы, NOx, летучих органических соединений, пыли из стационарных источников. Режим доступа: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2009/EB/wg5/wgsr45/Informal%20docs/No_1_russian_version.pdf

38. Ксенофонов Б. С., Иванов М. В. Интенсификация флотационной очистки в оборотных системах водопользования с использованием вибровоздействий. Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». Эл. № ФС 77-30569/340657, №02 февраль 2012 г. <http://technomag.edu.ru>.

39. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем, 2 изд., М., 1976.

40. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. - М.: Наука, 1986. 736 с.
41. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука. – 1973. – 847 с.
42. «Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения моря сбросом отходов и других материалов», 26.12.1972 г.
43. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
44. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1984. – 272 с.
45. Международная конвенция MARPOL 73/78.
46. Мешков Д.Е., Мешков Е.Е., Сиволгин В.С.. Исследование влияния объема всплывающего пузыря на характер течения. Вестник Саровского ФизТеха, №8, 2005г., с.68-73.
47. Мешков Е.Е, Невмержицкий Н.В., Рогачёв В.Г., Янилкин Ю.В. О возможной роли масштабного фактора в проблеме турбулентного перемешивания. Труды международной конференции V Харитоновские тематические научные чтения, Саров, 17-21 марта 2003 г, под редакцией Михайлова А.Л., с.415-418.
48. Модернизация систем управления гидроагрегатами компании «Укрэнерго». – ММ. Деньги и Технологии. Сентябрь 2010. – Режим доступа: http://www.metran.ru/netcat_files/462/362/9_04_p05.pdf.
49. Н. А. Слезкин. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. Гостехиздат. М., 1955, стр. 349 с.
50. Нгуен Х. Х. Оценка эмиссии отработавших газов дизелей эксплуатирующихся судов смешанного (река-море) плавания // Технические науки в России и за рубежом: материалы междунар. науч. конф. (г. Москва, май 2011 г.). – М.: Ваш полиграфический партнер, 2011. - С. 103-111.
51. Нунупаров С.М. Предотвращение загрязнения моря судами / С.М. Нунупаров. – М.: Транспорт, 1979. – 336 с.

52. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

53. Пат. 94014231 Российская Федерация, МПК6 В01D53/50, В01D53/14, С01В17/60. Способ очистки отходящих газов от диоксида серы / В.В. Тараторкин; А.П. Яковлев; Л.П. Лучина; А.М. Кампанщиков; Б.О. Дусебаев; заявитель и патентообладатель В.В. Тараторкин; опубл.10.04.1997.

54. Пейре Р., Тейлор Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Пер. с англ. — Л.: Гидрометеиздат, 1986 - 352 с., ил.

55. Повітряний кодекс України від 19.05.2011р.

56. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.

57. Рамм В. А., Абсорбция газов, 2 изд. М., 1976.

58. Родионов А.И. и др. Техника защиты окружающей среды. Учебник для вузов. - М.: Химия, 1989. - 512 с.

59. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч. 5. – С. 168 – 220.

60. Солодовніков В. Г. Удосконалення системи паливопідготовки суднових середньооберткових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку [Текст]: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03: захищена 03.02.16 / Солодовніков Валерій Григорович. – Одеса, 2016. – 201 с.

61. Стандартные технические требования к судовым инсинераторам. Резолюция МЕРС.93(45) от 5.10.2000 г.

62. Туркин А. В. Исследование возможности практического применения способа очистки выхлопных газов судового двигателя адсорбцией твердым веществом в присутствии озона. Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. №3/2014. – с.89-96

63. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения, пер. с англ., М., Мир. 1972.

64. Харлашин П.С.1, Яценко А.Н. Исследование характеристик движения пузырька при продувке жидкости нейтральным газом. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. Вип. №20. 2010 р. С. 53-57.

65. Чистяков С. Ф., Радун Д. В. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1972. – 392 с.

66. Электронный справочник по свойствам веществ, используемых в теплоэнергетике. ИВТ РАН-МЭИ (технический университет). 2003. – Режим доступа: <http://thermophysics.ru/triptych/modules/Es/Es/>.

67. Эстеркин Р. И., Иссерлин А. С., Певзнер М. И. Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива. – Л.: Недра, 1981. – 424 с.

68. A. McKinnon. The possible influence of the shipper on carbon emissions from deep-sea container supply chains: An empirical analysis. *Maritime Economics & Logistics* 16, March 2014. P. 1-19.

69. A. Backes, A. Aulinger, J. Bieser, V. Matthias, M. Quante. Ammonia emissions in Europe, part I: Development of a dynamical ammonia emission inventory. *Atmospheric Environment*. Volume 131, April 2016. P. 55-66.

70. Agrawal, H., Welch, W. A., Miller, J. W., and Cocker, D. R.: Emission Measurements from a Crude Oil Tanker at Sea, *Environ. Sci. Tech.*, 42, 2010. – P. 7098–7103.

71. Andreae, M. O., Gelencsér, A.: Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2006. – P.3131–3148.

72. Berg N., Mellqvist J., Jalkanen J.-P., Balzani J. Ship emissions of SO and NO DOAS measurements from air-borne platforms, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 2011. – P. 6273–6313.

73. Chakravarty A., Georghiou Th., Phillipson T.E., Walton A.J. (2004). Stable sonoluminescence within a water hammer tube // *Phys. Rev. E*. – 2004. –V.69. – P. 66-87.

74. Caterpillar Inc.: Caterpillar 3208 Marine engine specification sheet, 2010.

75. Communication with Wireless HART HCF_LIT-129, HART Communication Foundation, 2008.

76. Cooper D. A. Exhaust emissions from ships at berth. *Atmos. Environ.*, 37, 2003. – P. 3817–3830.

77. Corbett J. J., Winebrake J. J., Green E. H., Kasibhatle P., Eyring V., Lauer A. Mortality from ship emissions: a global Assessment. *Environ. Sci. Tech.*, 41, 2007 – P. 8512–8518.

78. D.A. Cooper. Exhaust emissions from ships at berth. *Atmospheric Environment*. Volume 37, Issue 27, September 2003. – P. 3817–3830.

79. E. Tzannatos. Costs and benefits of reducing SO₂ emissions from shipping in the Greek seas. *Maritime Economics & Logistics* 12, September 2010. – P. 280-294.

80. E.D. Vicente, M.A. Duarte, L.A.C. Tarelho, T.F. Nunes, F. Amato, X. Querol, C. Colombi, V. Gianelle, C.A. Alves. Particulate and gaseous emissions from the combustion of different biofuels in a pellet stove. *Atmospheric Environment*. Volume 120, November 2015. – P. 15-27.

81. Eyring V., Isaksenm I. S. A., Berntsen T., Collins W. J., Corbett J. J., Endresen O., Grainger R. G., Moldanova J., Schlager H., Stevenson, D. S. Transport impacts on atmosphere and climate shipping. *Atmos. Environ.*, 44, 2010. – P.4735–4771.

82. F. Apadula, A. Gotti, A. Pignini, A. Longhetto, F. Rocchetti, C. Cassardo, S. Ferrarese, R. Forza. Localization of source and sink regions of carbon dioxide through the method of the synoptic air trajectory statistics. *Atmospheric Environment*. Volume 37, Issue 27, September 2003. – P. 3757-3770.

83. Flannigan D.J., Suslick K.S. Molecular and atomic emission during single-bubble cavitation in concentrated sulfuric acid *Acoustics // Research Letters Online*.- 2005.-V.6. - №3. – P.157-161.

84. Fridell, E., Steen, E., Peterson K.: Primary particles in ship emissions, *Atmos. Environ.*, 42, 2008. – P. 1160–1168.

85. Golubev M.V. Automatization of the ship system for exhaust gases cleaning/ M.V. Golubev // *Электротехнические и компьютерные системы: научно-технический журнал*. – Киев: “Техника”, 2013. – № 10 (86). – С.74–79.

86. HART field communication protocol. – Application Guide HCF LIT 34, HART Communication Foundation, 1999. – 80 p.

87. Hiller R.A., Putterman S. J., Weninger K.R. Time-Resolved Spectra of Sonoluminescence // *Phys. Rev. Lett.* - 1998. - V.80. – P.1090–1093.

88. Hopkins S.D., Putterman S.J., Kappus B.A. Dynamics of a Sonoluminescing Bubble in Sulfuric Acid // *Phys. Rev. Lett.*- 2005.- V.95. – P.254-301.

89. Hulskotte J. H. J., Denier van der Gon H. Fuel consumption and associated emissions from seagoing ships at berth derived from an on-board survey. *Atmos. Environ.*, 44, 2010. – P.1229–1236.

90. J. Gallagher, R. Baldauf, C. H. Fuller, P. Kumar, L. Gill, A. McNabola. Passive methods for improving air quality in the built environment: A review of porous and solid barriers. *Atmospheric Environment*. Volume 120, November 2015. – P. 61-70.

91. Jalkanen J.-P., Brink A., Kalli J., Pettersson H., Kukkonen J., Stipa T. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2009. – P. 9209–9223.

92. J.-P. Jalkanen, L. Johansson, J. Kukkonen, A. Brink, J. Kalli, T. Stipa Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, March 2012. – P. 2641-2659.

93. Kasper A., Aufdenblatten S., Forss A., Burtscher H. Particulate emissions from a low-speed marine diesel engine, *Aerosol Sci. Tech.*, 41, 2007. – P.24–32.

94. K. Capaldo, J. Corbett, P. Kasibhatla, P. Fischbeck, S. Pandis. Effects of ship emissions on sulphur cycling and radiative climate forcing over the ocean. *Letters to Nature*. August 1999. – P. 743-746.

95. Lack D. A., Corbett J. J., Onasch T., Lerner B., Massoli P., Quinn P. K., Bates T. S., Covert D. S., Coffman D., Sierau B., Herndon S., Allan J., Baynard T., Lovejoy E., Ravishankara A. R., Williams E. Particulate emissions from commercial shipping:

Chemical, physical, and optical properties, *J. Geophys. Res.*, 114, 2009. – P.114-143.

96. Man Diesel and Turbo, MAN B&W: 6S90ME-C7 Project guide, electronically controlled two-stroked engines, 5 Edn., MAN Diesel, Teglholmegade 41, DK-2450 Copenhagen, Denmark, 2009.

97. Mario A.R. Talaia. Terminal velocity of a bubble rise in a liquid column. *World academy of Science, engineering and technology*. N. 28. 2007. – P. 264-268.

98. Matulja D., Dejhalla R. A Comparison of a ship hull resistance determined by different methods, *Eng. Rev.*, 27, 2007. – P.13–24.

99. Moldanova J., Fridell E., Popovicheva O., Demirdjian B., Tishkova V., Faccinnetto A., Focsa, C. Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine. *Atmos. Environ.*, 43, 2009. – P. 2632–2641.

100. Paxian, A., Eyring, V., Beer, W., Sausen, R., and Wright, C.: Present-Day and Future Global Bottom-Up Ship Emission Inventories Including Polar Routes, *Environ. Sci. Tech.*, 44, 2010. – P.1333–1339.

101. Petzold A., Hasselbach J., Lauer P., Baumann R., Franke K., Gurk C., Schlager H., Weingartner E. Experimental studies on particle emissions from cruising ship, their characteristic properties, transformation and atmospheric lifetime in the marine boundary layer. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2008. – P. 2387–2403.

102. Petzold A., Weingartner E., Hasselbach J., Lauer P., Kurok C., Fleischer, F. Physical properties, chemical composition and cloud forming potential of particulate emissions from a marine diesel engine at various load conditions, *Environ. Sci. Tech.*, 44, 2010. – P.3800–3805.

103. R. M. Davies, G. I. Taylor, “The mechanics of large bubbles rising through liquids in tubes”, *Proc. of Roy. Soc., London*, 200, Ser. A, 1950. – P. 375-390.

104. Sarvi A., Fogelholm C.-J., Zevenhoven R. Emissions from large-scale medium-speed diesel engines. Influence of engine operation mode and turbocharger. *Fuel Processing Technology*, 89, 2008. – P. 510–519.

105. V. Celo, E. Dabek-Zlotorzynska, M. McCurdy. Chemical Characterization of Exhaust Emissions from Selected Canadian Marine Vessels: The Case of Trace Metals and

Lanthanoids. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49 (8). – P. 5220–5226.

106. Wartsila. Project guide. URL: <http://www.wartsila.com/en/engines>.

107. Wild Y. *Container Handbook*. Vol. 3. Refrigerated containers and CA technology. Gesamtverband der Deutschen Ver-sicherungswirtschaft e.v., Berlin, 2009.

108. Winnes H., Fridell E. Emissions of NO and particles from Maneuvering Ships, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15, 2010. – P. 204–211.

109. Winnes H., Fridell E. Particle emissions from ships: Dependence on fuel type. / *J. Air Waste Manage.*, 59, 2010. – P. 1391–1398.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения результатов диссертационного исследования

АКТ

внедрения диссертационной работы

Голубева Максима Витальевича

Настоящий акт составлен комиссией судоходной компании ТВ Marine Hamburg в составе:

Капитан Цинцадзе Г.Д

Первый инженер Шуков А.В.

Суперинтендант Тодоров Х.Д.

в том, что в соответствии с предложениями и рекомендациями диссертационной работы М.В.Голубева в судовых условиях эксплуатации судна Chemical product tanker "Amy", Liberia было установлено следующее:

1. Предлагаемая судовая установка обработки уходящих дымовых газов повышает эффективность процесса очистки и снижения выбросов в атмосферу основных токсичных составляющих продуктов сгорания. Показатели выбросов были снижены ниже нормативно установленного уровня на 4,7 %.

2. Разработанная система регенерации тепла позволила снизить температуру выбрасываемых в атмосферу судовых дымовых газов с 130 °С до 75-94 °С.

3. Универсальность конструкции и рабочего процесса позволила интегрировать разработанный узел обработки дымовых газов в технологический контур судовой энергетической установки без значительных материальных затрат и проведения трудоемких операций.

4. За счет внедрения установки очистки дымовых газов был получен эффект снижения выбросов SO_x при работе судна высокосернистом топливе до показателей, соответствующий использованию низкосернистого топлива.

Члены комиссии:

Капитан

Первый инженер

Суперинтендант



Цинцадзе Г.Д

Шуков А.В.

Тодоров Х.Д.

| | |
|----------------|---------------------|
| NAME | : MT AMY |
| CALL SIGN | : A8SA5 |
| FLAG / REG. | : LIBERIAN/MONROVIA |
| IMO / OFF. NO. | : 9422641 / 14187 |
| GROSS/NET | : 23224 / 9968 |
| ENGINE O/P | : 7860 kw |

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи Національного
університету «Одеська морська академія»
д.т.н., професор



В. А. Голиков

« 21 » січня 2016 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Голубева Максима Віталійовича на тему «Удосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих випускних газів суднової дизельної установки» у науково-дослідній роботі НУ «ОМА»

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини університету Савчук В.Д., провідний фахівець НДЧ Фірсанова О.О. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Голубева М. В. на тему «Удосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих димових газів суднової дизельної установки» увійшли складовою частиною у звіт по науково-дослідній роботі «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології», яка виконувалась в університеті (ДР № 0114U000346, науковий керівник – д.т.н., професор Голиков В.А.).

Начальник науково-дослідної
частини НУ «ОМА»,
к.т.н., професор

В.Д. Савчук

Провідний фахівець

О.О. Фірсанова

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного
університету «Одеська морська академія»

д.ю.н., професор



О. М. Шемякін

« 14 » січня 2016 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Голубєва Максима Віталійовича на тему «Удосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих випускних газів суднової дизельної установки» у навчальному процесі НУ «ОМА»

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу Національного університету «Одеська морська академія» Пархоменко М. М. та завідувач кафедри технічної експлуатації флоту д.т.н., професор Голіков В. А. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Голубєва М. В. на тему «Удосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих димових газів суднової дизельної установки» впровадженні у навчальному процесі кафедри технічної експлуатації флоту, а саме:

– у лекційних заняттях з дисципліни «Технічна експлуатація суднових енергетичних установок», яку читають курсантам 5-го курсу судномеханічного факультету;

– у лекційних заняттях з дисципліни «Оптимізація режимів роботи суднових енергетичних установок», яку читають курсантам 6-го курсу судномеханічного факультету.

Начальник навчального
відділу НУ «ОМА»

М. М. Пархоменко

Завідуючий кафедрою ТЕФ

д.т.н., проф. В. А. Голіков

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Патент на полезную модель****Судовая автоматизированная система фильтрации дымовых газов**

B8

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ"
 (УКРПАТЕНТ)

вул. Глазунова, 1, м. Київ-42, 01601, Україна Тел.: (044) 494-05-05 Факс: (044) 494-05-06
 E-mail: office@ukrpatent.org

16.08.2016 № 16823/ЗУ/16

Висновок, затверджений Державною службою інтелектуальної власності України, набув статусу **рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель**

Адреса для листування
 Науково-дослідна частина, вул. Дідріхсона, 8, корп. 1, м. Одеса, 65029

Стосується заявки № у 2016 04104
 / при листуванні просимо посилатися на цей № /



Висновок про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами формальної експертизи

- (21) Реєстраційний номер заявки **у 2016 04104**
- (22) Дата подання **14.04.2016**
- (71) Заявник(и)
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"
- (72) Повне ім'я винахідника(ів)
Голіков Володимир Антонович, Голубев Максим Віталійович, Стеценко Максим Сергійович
- (73) Власник(и) патенту
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ",
 вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, UA
- (74) Представник у справах інтелектуальної власності
Савчук Віктор Дмитрович
- (51) МПК
B01D 53/14 (2006.01)
- (54) Назва корисної моделі
СУДНОВА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ФІЛЬТРАЦІЇ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Формула винаходу

Суднова автоматизована система фільтрації димових газів, що містить фільтраційні касети мокрої очистки газів, систему газоходів для підводу і відводу димових газів, систему трубопроводів для підводу та відводу фільтруючої води та вентилятор, **яка відрізняється тим, що** фільтраційні касети разом із системою газоходів утворюють замкнуту гідравлічну систему, а кількість працюючих одночасно фільтраційних касет залежить від питомої витрати димових газів, температури димових газів на виході з фільтраційної касети, температури фільтраційної води і вмісту шкідливих речовин у газі на виході з фільтраційної касети та керується блоком управління шляхом подачі відповідних сигналів до дистанційних запірних клапанів, які встановлені в системах газоходів та підводу і відводу фільтруючої води.

Заявник

Ректор НУ «ОМА» М. В, Міусов

Автори

В. А. Голюков

М. В. Голубєв

М. С. Стеценко