

УДК 629.123

Голубев М.В.
ОНМА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СУДОВЫХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ТОКСИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

При эксплуатации судов водного транспорта очень актуальна экологическая проблема обработки уходящих дымовых газов. Очистка дымовых газов от вредных токсичных составляющих снижает выбросы от продуктов горения в окружающее пространство, а при концентрации 1 г/м^3 может быть даже рентабельной.

Согласно требованиям Резолюции МЕРС.176(58), принятой на 58-й сессии Комитета по защите морской среды (Пересмотренное Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ [1]) концентрация вредных выбросов в дымовых газах контролируется по двум параметрам: взвешенному выбросу окислов азота NO_x и окислам серы SO_x с твердыми частицами. Величина их численных значений постоянно снижается в разы, а районы контроля выбросов, начиная с 2015 г., покрывают практически все районы плавания планеты.

Для проведения научно-исследовательских работ по очистке дымовых газов от NO_x и SO_x в условиях работы судовой энергетической установки на судне Chemical product tanker “Amy”, Liberia была разработана экспериментальная установка. Ее общая схема показана на рисунке 1, а сама установка может рассматриваться, как один из вариантов исполнения судового узла обработки уходящих дымовых газов, характеризующегося малой производительностью [2]. Основной принцип работы стенда был основан на постоянном автоматическом контроле следующих рабочих характеристик:

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

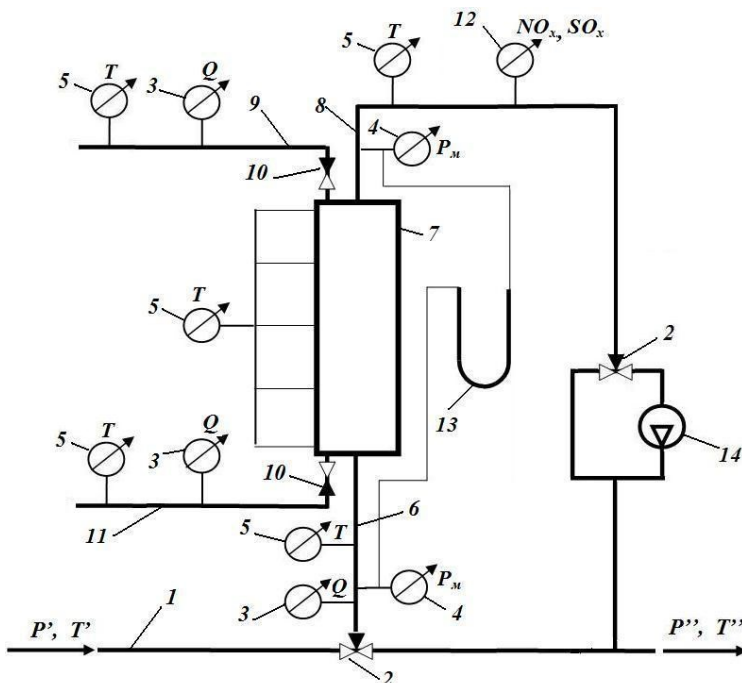


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

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

Работа стенда подразумевала циркуляцию дымовых газов по замкнутой линии, а сама установка работала с использованием следующего судового технологического контура: дымовые газы подавались на обработку по судовому дымоходу 1. Канал, для подвода газов был цилиндрической формы и его диаметр был равен 1,5 м.

Подача дымовых газов производилась посредством работы турбунагнетателя. Первоначально, после газовой турбины дымовые газы поступали в котел-утилизатор. Избыточное давление, развиваемое турбунагнетателем в зависимости от числа оборотов турбины составляло:

$$P = 170000 \text{ Па при } n = 17000\text{-}18000 \text{ об/мин};$$

$P = 90000$ Па при $n = 9000-10000$ об/мин;

$P = 40000$ Па при $n = 4000-5000$ об/мин.

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 дымовых газов перенаправляется в сторону судового узла обработки.

На линии подачи дымовых газов 6 в фильтрационную кассету 7 был установлен ряд приборов. Расход дымовых газов контролировался при помощи ультразвукового расходомера 3. Он был установлен на входном эжекторном участке фильтрационной кассеты 7. Давление и температура дымовых газов на входе в узел обработки измерялись при помощи манометра 4 и термометра 5.

Дымовые газы попадали в фильтрационную кассету 7, высота которой составляла 2,5 м. Падение температуры по высоте кассеты контролировалось в пяти створах при помощи термопар, которые являлись составной частью автоматической системы управления.

Как видно на рисунке 2 начальная и конечная точки измерения температуры находились непосредственно вблизи нижней и верхней стенок рабочей камеры. Створы с термопарами находились на расстоянии 25 мм от стенок (1% высоты рабочей камеры). Расстояние между всеми измерительными створами было одинаковым и составляло 612 мм.

После прохождения фильтрационной кассеты 7 обработанные дымовые газы попадали в линию отвода 8. На этой линии осуществлялся контроль трех рабочих параметров. Давление измерялось манометром 4, температура – термометром 5, а остаточное содержание примесей (NO_x и SO_x) газоанализатором 12. Принцип его работы основан на сравнении эталонных показателей по составу NO_x и SO_x с действительными. Разность этих показателей выводилась на цифровой индикатор и дублировалась выводом через усилитель сигнала по проводной связи на монитор, расположенный на центральном посту управления. Усилителем осуществлялось преобразование получаемого с термопар цифрового сигнала в аналоговый.

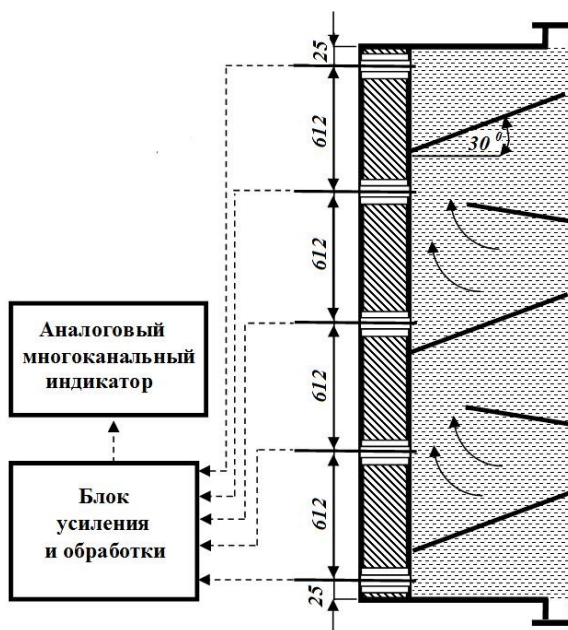


Рис. 2. Расположение термопар по высоте фильтрационной кассеты

Для дополнительного визуального контроля величины перепада давлений внутри узла обработки дымовых газов ко входу и выходу фильтрационной кассеты были подключены две линии U-образного дифференциального манометра. Его показания позволяли контролировать правильность работы манометров и одновременно их дублировали [3].

На линии отвода дымовых газов δ был установлен автоматически управляемый трехходовой клапан 2. При работе турбонагнетателя на высоких и средних оборотах развиваемое им давление обеспечивало движение дымовых газов по всей рабочей линии установки с учетом гидравлических потерь внутри фильтрационной колонны. В случае, когда обороты турбины были низкими гидравлические потери на фильтрационной колонне становились идентичными исходному давлению потока и для отвода обработанных дымовых газов необходимо было использовать дополнительный вентилятор 14. Клапан 2 автоматически перенаправлял поток с линии безнапорного движения на параллельную ветку, содержащую нагнетатель.

Для заполнения фильтрационной кассеты водой к ее верхнему входному патрубку подключалась линия 9. На этом трубопроводе был установлен невозвратный клапан 10, обеспечивающий необходимый расход воды и герметизацию линии подачи 9 от проникновения обрабатываемых дымовых газов. Расход воды и ее температура контролировались при помощи измерительной диафрагмы 3 и термометра 5.

По аналогии с линией подачи 9 к патрубку, расположенному в нижней части фильтрационной кассеты 7, была подключена линия дренажа загрязненной фильтрационной воды 11. Для контроля рабочего перепада температуры воды в фильтрационной колонне 7 и ее количества, утерянного из-за возникающих при обработке дымовых газов процессов тепломассопереноса, на линии 9 использовалась измерительная диафрагма 3 и термометр 5.

Общая длина дымового тракта научно-исследовательской установки составляла 12 м. Характерными технологическими участками были: расстояние от котла-утилизатора до установки 8 м; расстояние от установки до среза дымовой трубы (выхода в атмосферу) - 4 м.

В ходе экспериментов была выполнена оценка погрешности геометрических размеров стенда и результатов измерений основных технологических параметров.

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

Согласно сертификату индивидуальных стендовых испытаний производителя точность измерений использованного лазерного дальномера Leica Disto D8 составляла: - линейный размер $\Delta_L = \pm 1$ мм; угол $\Delta_\alpha = \pm 0,1$ град.

Расход дымовых газов контролировался при помощи ультразвукового расходомера Flowsic 100 (SIC MAIHAK GmbH, Германия). Принцип его работы основан на использовании время-импульсного метода измерения скорости дымовых газов в дымоходе. Его электронный блок попеременно подавал на пьезоизлучатели ультразвуковой сигнал по потоку дымовых газов и против него. Разность времени распространении ультразвукового сигнала против потока и по

поток был пропорционален средней скорости движения дымовых газов в дымоходе. Величина расхода дымовых газов определялась по выражению:

$$Q = kS(t'' - t') \quad (1)$$

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

Расходомер предназначен для работы на диаметрах дымоходов от 1,4 до 13 м при температуре дымовых газов от -40°C до 450°C и скорости их движения от 2 до 40 м/с. Относительная погрешность расходомера в установленном диапазоне скорости движения дымовых газов (в пределе допускаемой приведенной погрешности $\pm 0,1$ м/с) согласно данным изготовителя составляла $\Delta_Q = \pm 0,5\%$.

Состав дымовых газов до и после судового узла их обработки контролировался при помощи газоанализатора Dräger MSI Variox-2. Характеристики его заводской настройки позволяют контролировать содержание в дымовых газах следующих компонент: CO_2 , CO , O_2 , NO , NO_2 , SO_2 . При работе судна на стандартизованном дизельном топливе концентрация CO_2 определялась по остаточной концентрации кислорода. В соответствии с техническими данными диапазоны граничных значений измерений для газоанализатора Dräger MSI Variox-2 показаны в таблице 1.

Таблица 1. Диапазоны измерений газоанализатора 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 |

Газоанализатор Dräger MSI Variox-2 был снабжен встроенным мембранным насосом, при помощи которого производился парциальный отбор уходящих дымовых газов с последующей их подачей в

рабочую камеру. Состав газов обрабатывался электрохимическим датчиком, а получаемые значения концентрации измеряемых и рассчитываемых компонент выводились в реальном времени на цифровой индикатор. Одновременно все значения подавались на пульт ЦПУ.

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

Температура дымовых газов во всех каналах определялась при помощи термометра brigon flue gas thermometer (Великобритания). Он монтировался непосредственно на дымоходе и глубина его погружения внутрь канала согласно рекомендациям 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°C . согласно паспортным данным его диапазон измерений находится в пределах от 0°C до 500°C , а относительная погрешность измерения температуры дымовых газов равна $\Delta_T = \pm 1\%$.

Изменение температуры смеси воды и дымовых газов по высоте фильтрационной кассеты 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 $150^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Согласно паспортным данным производителя предел допускаемых отклонений при измерениях составляют $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$.

Для контроля показаний манометров на входе и выходе в фильтрационную кассету и визуального измерения перепада давлений внутри узла обработки дымовых газов ко входу и выходу фильтрационной кассеты были подключены две линии U-образного дифференциального водяного манометра. При измерениях было принято [4], что значение погрешности с учетом перечисленных параметров по миллиметровой шкале не превышало ± 1 мм.

Расход воды, подаваемой и отбираемой из фильтрационной каскады, 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 $D_u = 1$ мм; наружный (внешний) диаметр $D = 57$ мм; условное рабочее давление в трубопроводе P_y до 2,5 МПа; погрешность измерений $\Delta_Q = \pm 1,5$ %.

В таблице 2 приведены сводные данные о погрешности результатов натурных исследований.

Таблица 2. Погрешности измерений при работе судовой энергетической установки

| 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 дымовых газов | См. табл. 1 |
| Относительная погрешность измерений давления дымовых газов | $\Delta_P = \pm 0,1$ % |
| Относительная погрешность измерения температуры дымовых газов | $\Delta_T = \pm 1\%$ |
| Абсолютная погрешность дифманометра при определении давления по миллиметровой шкале | $\Delta_{up} = \pm 1$ мм |
| Абсолютная погрешность измерения расхода воды | $\Delta_Q = \pm 1,5$ % |

Во время экспериментальных исследований имели место следующие рабочие параметры дымовых газов и геометрические размеры подводящих линий:

1. Диапазон расхода дымовых газов на входе в установку - от 4000 до 10000 м³/ч (от 1,111 до 2,778 м³/с).
2. Температура дымовых газов в газовом тракте после утилизационного котла - 140 °С.
3. Диаметр цилиндрической части судового дымохода - 1 м.

4. Диаметр входа в фильтрационную колонну - $0,1$ м.
5. Внутренние габаритные размеры фильтрационной колонны - длина 1 м; ширина 1 м; высота $2,5$ м.
6. Скорость дымовых газов на входе в фильтрационную колонну - от $1,415$ до $3,538$ м/с.
7. Концентрация NO_x в дымовых газах после утилизационного котла - от 28 до 60 г/кВтч;
8. Концентрация SO_x в дымовых газах после утилизационного котла - от 11 до 29 г/кВтч;

При проведении экспериментальных исследований было изучено, каким образом изменяется температура дымовых газов по высоте фильтрационной колонны судового узла очистки дымовых газов. Замеры производились в пяти измерительных створах, расположенных по высоте рабочей камеры на одинаковых расстояниях (см. рис.2). На рисунке 3 показаны полученные результаты в зависимости от величины объемного расхода подаваемых дымовых газов. Каждая экспериментальная точка соответствует набору из пятидесяти измерений и является результатом их осреднения.

Как и следовало ожидать рост скорости (расхода) дымовых газов на входе в фильтрационную колонну приводил к ухудшению процесса отбора тепла. Сокращение времени контактного взаимодействия приводило к уменьшению разности температур дымовых газов на входе и выходе в установку. Как видно на графике, изменение скорости всего на $2,123$ м/с привело к увеличению температуры на выходе с 90 до 98 °С.

В ходе проведения экспериментальных исследований была выполнена оценка степени эффективности очистки дымовых газов от вредных составляющих NO_x и SO_x . На рисунках 4-5 для различных значений площади контакта дымовых газов с водой показаны разности концентраций на входе и выходе из установки. При неизменном значении объемного расхода и одинаковых конструктивных размерах установки различная площадь контакта достигалась изменением размеров газовых пузырьков на входе в фильтрационную кассету.

Следует отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с известным качественным результатом - оксиды серы в воде растворяются менее интенсивно, чем оксиды азота [5].

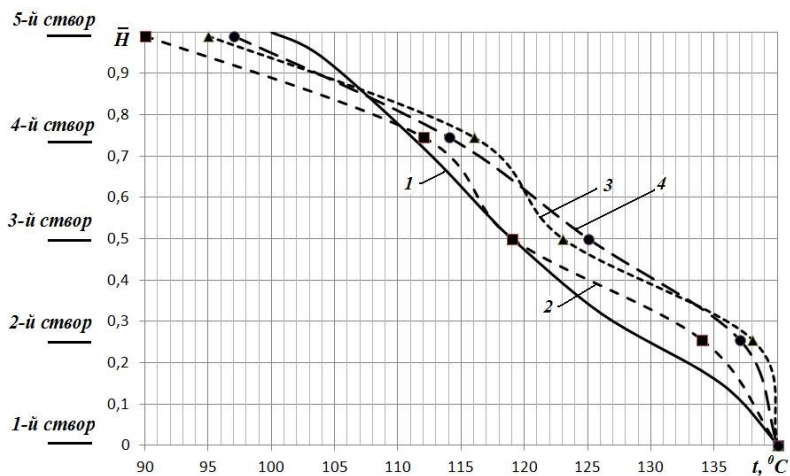


Рис. 3 Распределение температуры по высоте колонны в зависимости от скорости подачи дымовых газов. 1 - расчет; 2 - $V = 1,415$ м/с; 3 - $V = 2,739$ м/с; 4 - $V = 3,538$ м/с.

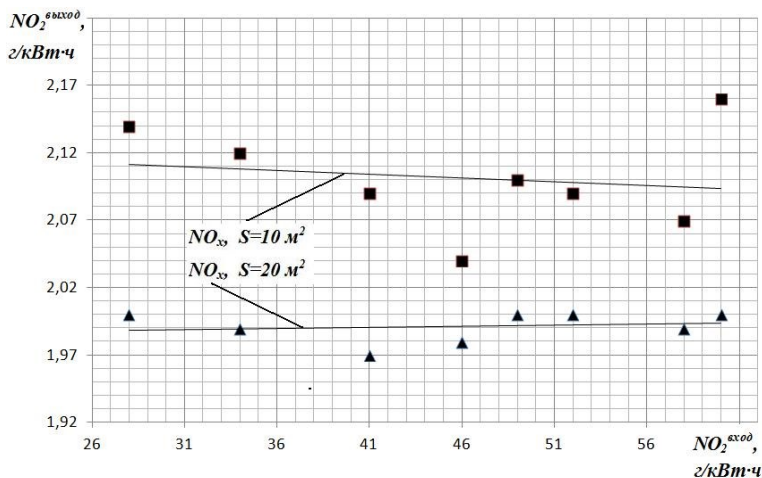


Рис. 4. Падение концентрации NO_x в зависимости от площади контакта

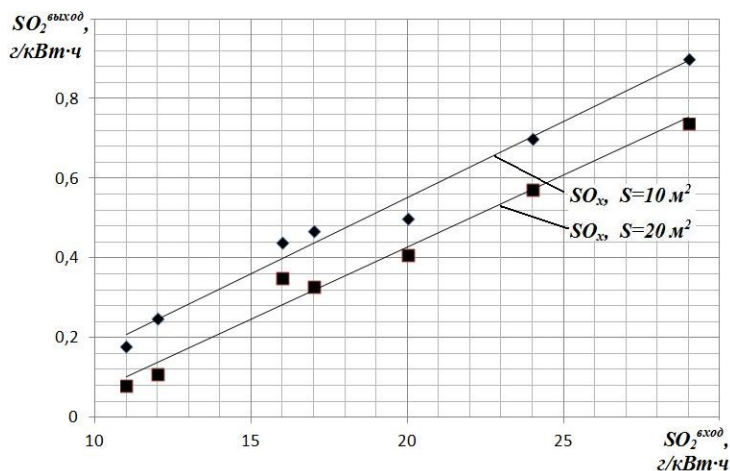


Рис. 5. Падение концентрации SO_x в зависимости от площади контакта

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 по сравнению со случаем изменения концентрации оксидов азота. Подобное расхождение может быть объяснено различными значениями разброса данных при проведении измерений выходной концентрации и спецификой проходящих внутри фильтрационной колонны физико-химических процессов.

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 дымовых газов. В действительности, как видно на экспериментальных фотографиях, взятых из работы [6] и показанных на рисунке 6 форма воздушного пузырька при подъеме в водяном столбе становится близка к плоской линзе, что в применении к обработке водой дымовых газов может рассматриваться, как положительный результат, приводящий к росту площади контакта.

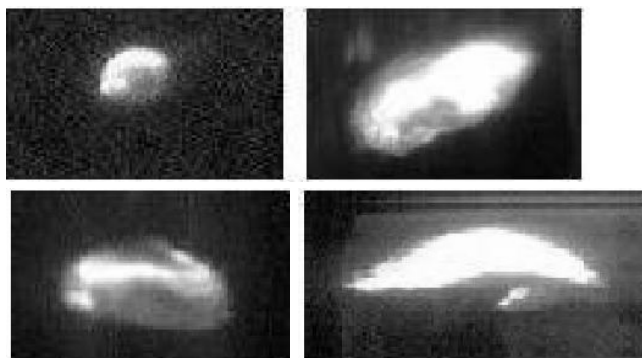


Рис. 6. Трансформация формы воздушного пузырька при всплывании в неподвижной воде [6].

В ходе экспериментальных работ была составлена сводная расходная номограмма для определения числа фильтрационных кассет, которые должны быть задействованы в рабочем процессе. Она показана на рисунке 7, где видно, что процесс запуска установки должен начинаться с величины расхода дымовых газов равной $400 \text{ м}^3/\text{ч}$, а использование фильтрационных кассет необходимо производить ступенчато.

В диапазоне малых расходов от 400 до $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ достаточно работы одной фильтрационной кассеты. В диапазоне от 4000 до $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ необходимо одновременное использование двух кассет с поддержанием одной (третьей) кассеты в резервном состоянии. При расходе дымовых газов от 6000 до $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ необходимо задействовать три фильтрационные кассеты с поддержанием четвертой в не используемом, но резервном и готовом к запуску состоянии. При индикации высокого расхода и увеличивающихся показаний газоанализатора по выбросам NO_x в процесс обработки дымовых газов должны вводиться все четыре кассеты.

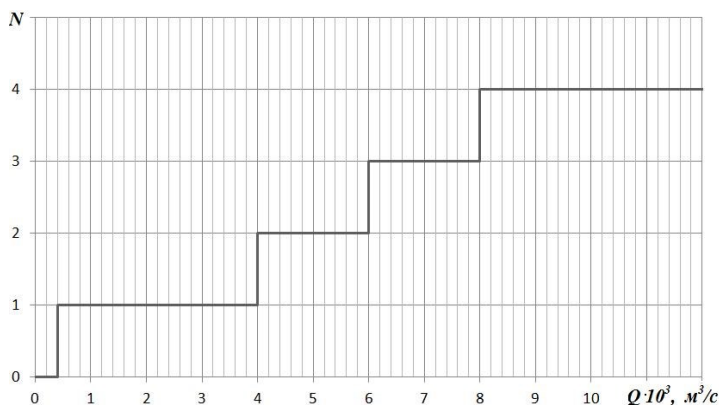


Рис. 7. Зависимость числа работающих фильтрационных кассет от расхода дымовых газов

Приведенные выше результаты были получены путем измерений величины предельной концентрации выбросов, но минимальное число используемых кассет еще также лимитируется величиной окончательной температуры дымовых газов. При работе установки ее предельное значение не должно превышать величину 90°C . На рисунке 8 показана экспериментально полученная зависимость температуры уходящих дымовых газов от числа кассет, участвующих в процессе их обработки.

Анализ рисунков 6 и 7 позволяет сделать однозначный вывод - рациональное снижение температуры и получение нормативных значений выбросов токсичных составляющих в дымовых газах достигается при использовании только четырех фильтрационных кассет. В остальных случаях снижение числа работающих фильтрационных кассет должно определяться текущей производственной необходимостью. Если приоритетом является только очистка дымовых газов от вредных составляющих, то необходимо использовать график на рис. 7, а если важно использовать схему регенерации тепла, то тогда график на рис. 8.

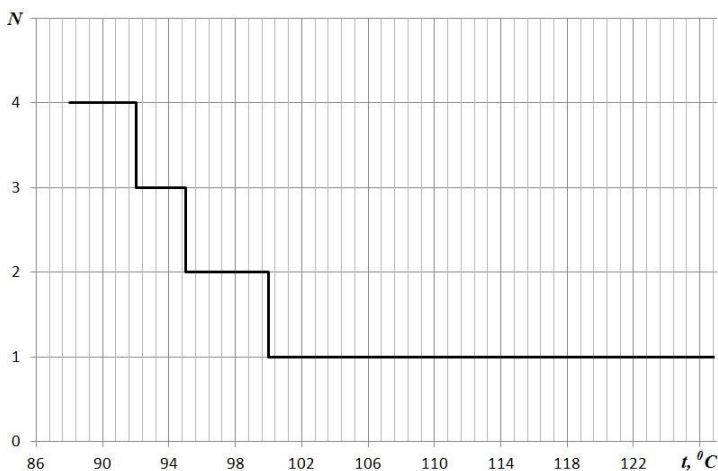


Рис. 8. Зависимость выходной температуры дымовых газов от числа работающих фильтрационных кассет

Выводы

1. Для повышения эффективности процесса обработки судовых дымовых газов необходимо увеличивать поверхность контакта судовых дымовых газов с водой внутри фильтрационной кассеты. Конструктивно это возможно сделать путем генерирования в нижней части кассеты газовых пузырьков максимального диаметра и выбором угла наклона направляющих пластин внутри фильтрационных кассет таким образом, чтобы обеспечить максимально долгий контакт дымовых газов с водой.

2. При изучении изменения температуры дымовых газов по высоте фильтрационной колонны было установлено, что рост скорости (расхода) газового потока на входе в фильтрационную колонну приводил к ухудшению процесса отбора тепла. Сокращение времени контактного взаимодействия приводило к уменьшению разности температур дымовых газов на входе и выходе в установку.

3. При экспериментальной оценке степени эффективности очистки дымовых 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. Также установлено, что оксиды серы SO_x в воде растворяются менее интенсивно, чем оксиды азота NO_x .

4. Составлена экспериментальная номограмма для определения числа фильтрационных кассет, которые должны быть задействованы в рабочем процессе. Установлено, что процесс обработки дымовых газов должен начинаться с величины расхода равной $400 \text{ м}^3/\text{ч}$, а использование фильтрационных кассет необходимо производить ступенчато:

при малых расходах от 400 до $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ - одна фильтрационная кассета;

при средних расходах от 4000 до $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ – две фильтрационные кассеты;

при больших расходах от 6000 до $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ - три фильтрационные кассеты с поддержанием четвертой в не используемом, но резервном состоянии;

при расходе более $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ или резком увеличении показаний газоанализатора по выбросам NO_x - четыре фильтрационные кассеты.

5. Рациональное снижение температуры и получение нормативных значений выбросов токсичных составляющих в дымовых газах достигается при использовании только четырех фильтрационных кассет. В остальных случаях снижение числа работающих фильтрационных кассет должно определяться текущей производственной необходимостью с использованием полученных номограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция MARPOL 73/78.
2. Нунупаров С.М. Предотвращение загрязнения моря судами / С.М. Нунупаров. – М.: Транспорт, 1979. – 336 с.
3. Чистяков С. Ф., Радун Д. В. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1972. – 392 с.
4. Эстеркин Р. И., Иссерлин А. С., Певзнер М. И. Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива. – Л.: Недра, 1981. – 424 с.
5. Flannigan D.J. and Suslick K.S. Molecular and atomic emission during single-bubble cavitation in concentrated sulfuric acid Acoustics // Research LettersOnline.- 2005.-V.6. -№3. - P.157-161.
6. R. M. Davies, G. I. Taylor, “The mechanics of large bubbles rising through liquids in tubes”, Proc. of Roy. Soc., London, 200, Ser. A, pp.375-390, 1950.