

6. ГОСТ Р 51249-99. Государственный стандарт Российской Федерации. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения / Госстандарт России. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. — 17 с.

7. ГОСТ 30574-98. Межгосударственный стандарт. Дизели судовые тепловозные и промышленные. Измерение выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Цикл испытаний. — Минск: ИПК Изд-во стандартов, 1999. — 90 с.

8. ГОСТ 10448-80. Межгосударственный стандарт. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Приемка. Методы испытаний. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. — 38 с.

9. *Зиненко Н. Н.* Решение проблем охраны окружающей среды в компании «СКФ Новошип» / Н. Н. Зиненко // Материалы IX науч.-техн. конф., 17–18 декабря 2010 г. / МГА им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — Новороссийск, 2011.

10. Пат. 110068 РФ. Система мониторинга энергоэффективности и экологической безопасности судов (S3ES-Novoship) / Зиненко Н. Н., Пруцков А. Г., Бордунов Б. В., Букаренко Ю. Г., Мартынович Е. С., Яременко Е. В., Панамарев В. Е.; патентообладатель ОАО «Новошип». — 2011.

УДК 502.3

М. А. Вострикова,
канд. техн. наук,
ФГБОУ ВПО «Краснодарский государственный
университет культуры и искусств»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ ОКСИДОВ СЕРЫ ОТ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

MODELING REDUCTION OF AIR POLLUTION EMISSIONS OF SULFUR OXIDES FROM SHIPS POWER PLANTS

В статье рассматривается проблема снижения выбросов оксидов серы от судовых энергетических установок путем применения установки поглощения газовых выбросов (УПГВ) с двухступенчатой очисткой. Приводится полученная при помощи метода планирования эксперимента математическая модель.

The article deals with the problem of reducing sulfur oxide emissions from ship power plants through the use of the installation of the absorption of gas emissions with two-stage cleaning. Provides obtained using the method of experiment planning mathematical model.

Ключевые слова: морские суда, выбросы, токсичность, атмосфера, загрязняющие вещества, оксид серы, топливо, способы очистки.

Key words: ships, emissions, toxicity, atmosphere, pollutant, sulfur oxide, fuel, cleaning method.

РАСТУЩИЕ масштабы распространения загрязняющих веществ над океаном в результате сжигания топлива, особенно эмиссия в атмосферу оксидов серы, вызывают все большие опасения, и данная проблема усугубляется по мере роста мирового флота и растущих глобальных масштабов потребления бункерного топлива [1].

Одним из перспективных способов очистки продуктов сгорания от выбросов соединений серы с судовых энергетических установок является применение установок поглощения газовых

выбросов (УПГВ). Устройство представляет собой двухступенчатое смешивание газа с жидкостью и используется для очистки газовых потоков [2].

На первой ступени процесс осуществляется в струйном аппарате за счет пульсационной подачи насыщенного пара, который в процессе инъекции загрязненного потока с более низкой температурой конденсируется и поглощает в процессе конденсации отдельные компоненты газового потока. Поглощение газов конденсатом пара происходит также на перфорированных поверхностях, размещенных в диффузоре струйного аппарата коаксиально, подверженных вибровоздействию и дополнительно охлаждаемых тепловыми трубами, оребрением одного конца которых являются перфорированные поверхности. Вторая ступень служит для растворения непоглотившихся компонентов газового потока в жидкости за счет пористого фильтра, вибрирующего и смоченного жидкостью. Процесс поглощения газа жидкостью происходит в порах смачиваемого фильтра при его вибрации.

Принцип действия УПГВ 5 заключается в следующем. Продукты сгорания поступают в бак-основание через патрубок в верхней его части и, контактируя с водой, предварительно заливаемой в бак, несколько охлаждаются и очищаются. Далее газы направляются в блоки для фильтров, заполненных кассетами. Одновременно в работу включается система орошения, представляющая собой вибратор и душирующее устройство, в которое вода подается насосом через задвижку из бака-основания. Вибрация передается коробам и кассетам. Таким образом, продукты сгорания проходят через смоченные и вибрирующие кассеты противотоком навстречу стекающей воде. Кассеты представляют собой многослойные (до 10 слоев) сетчатые фильтры. Образующиеся на этих фильтрах пленки жидкости под действием вибрации обеспечивают процесс вибротурбулизации. Известно, что в этом процессе растворимость газов в воде существенно увеличивается [4]. После коробов остаточные газы дымососом откачиваются из отсека и направляются в дымовую трубу. Анализ дымовых газов осуществляется перед входом продуктов сгорания в бак-основание и перед дымососом. Вода циркулирует по замкнутому контуру до насыщения растворившимися оксидами. Контроль этого процесса выполняется по величине pH воды. При достижении pH6 часть воды сбрасывается в дренаж и на ее место доливается свежая вода. Отбор проб воды осуществляется через штуцер. Вибратор представляет собой электродвигатель, вал которого выходит за обмотки статора. На обоих концах вала установлены дебалансы — грузики, смещаемые относительно центра вала. Изменение положения дебалансов позволяет задавать амплитуду колебаний, от которой существенно зависит процесс поглощения оксидов. В реальных условиях была смонтирована УПГВ 6, аналогичная по конструкции УПГВ 5, но оборудованная предварительной ступенью очистки продуктов сгорания в виде струйного аппарата (рис. 1).

Для определения эффективности очистки продуктов сгорания от оксидов серы в струйном аппарате были проведены эксперименты на установке поглощения газовых выбросов УПГВ 6, оборудованной предварительной ступенью очистки продуктов сгорания в виде струйного аппарата (рис. 1). Струйный аппарат создан на базе результатов лабораторных исследований и использования геометрического и газодинамического подобия по числу Рейнольдса (Re) для модели и натурального образца с использованием положений [5].

Расход дымовых газов определялся по расходу топлива и материальному балансу при измерении температур и расходов орошающей жидкости и продуктов сгорания на входе и выходе УПГВ 6. Для анализа продуктов сгорания использовался газоанализатор типа IMR 3000 P.

Результаты эксперимента показали, что в струйном аппарате при смешении продуктов сгорания и водяного пара, который направлялся в приемную камеру струйного аппарата из рядом расположенного парового котла в количестве, соответствующем коэффициенту инъекции, процент поглощения оксидов составил по SO_2 около 68 %. После струйного аппарата газовый поток направлялся в УПГВ 6, в которой поглотилось: 75 % SO_2 от остаточной после струйного аппарата концентрации. Общий процент поглощения оксидов по предлагаемой схеме очистки продуктов сгорания достигает 92 % по SO_2 , что позволит обеспечить выполнение требований Приложения VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL 73/78).

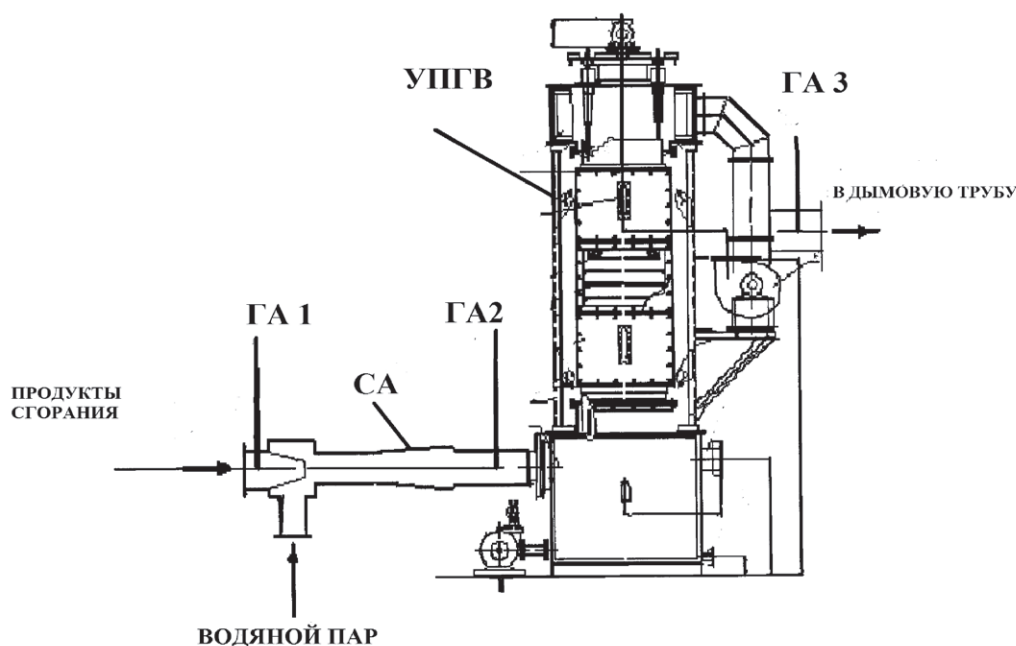


Рис. 1. Схема присоединения струйного аппарата к УПГВ 6:
 СА — струйный аппарат;
 ГА1, ГА2, ГА3 — места отбора проб продуктов сгорания на газоанализатор IMR-3000P

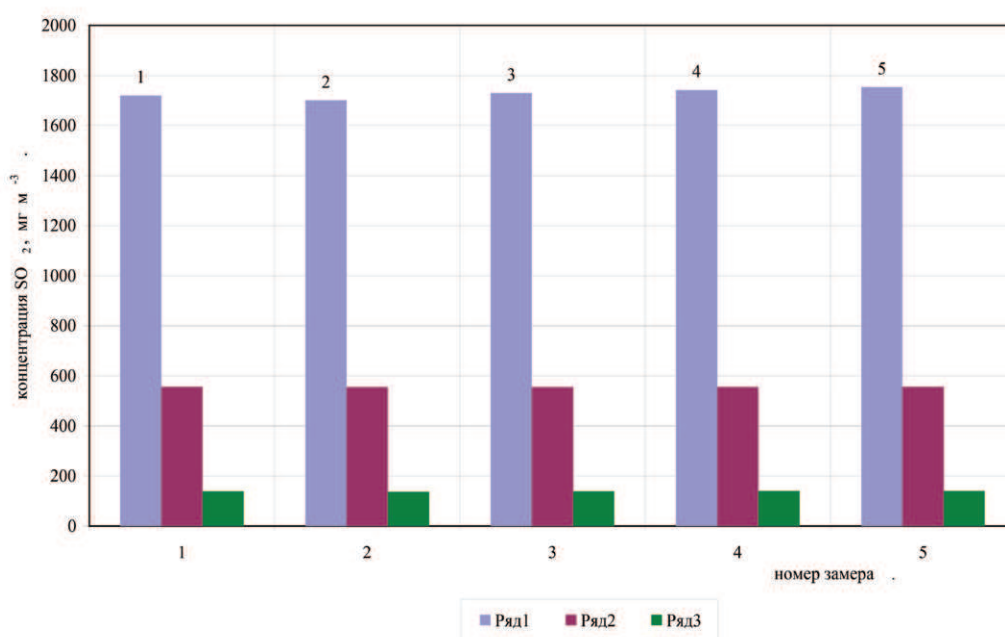


Рис. 2. Изменение концентрации SO_2 по газовому тракту в процессе испытаний УПГВ 6:
 ряд 1 — точка замера ГА1 (до струйного аппарата);
 ряд 2 — точка замера ГА2 (после струйного аппарата);
 ряд 3 — точка замера ГА3 (после УПГВ 6)

Эксперименты были проведены по специальному плану с целью получения математической модели, которая описывает влияние расхода активного потока модельного газа и исходной концентрации в нем диоксида серы на конечную концентрацию диоксида серы. Разработка этого плана осуществлялась с учетом рекомендаций теории планирования эксперимента [3].

Математическая модель, представляющая собой уравнение регрессии, задаваемое полиномом второй степени, в общем случае имеет следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y — исследуемая величина (концентрация диоксида серы на выходе из струйного аппарата), мг/м³; x_i, x_j — значения факторов в кодированном масштабе; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} — оценки коэффициентов уравнения регрессии.

Для отыскания неизвестных оценок b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} применяется метод наименьших квадратов с использованием зависимостей регрессионного анализа. При этом приняты следующие допущения: независимые факторы x_i, x_j заданы абсолютно точно и являются неслучайными величинами. Также предполагается, что случайная величина y распределена по нормальному закону, а ее дисперсии в отдельных точках факторного пространства однородны.

Для определения оценок коэффициентов уравнения (1) используется план по схеме полного факторного эксперимента. При этом каждый из двух независимых факторов (z_1 — концентрация диоксида серы на входе в струйный аппарат мг/м³; z_2 — расход активного потока, м³/с) варьировался на трех уровнях: +1 — высокое значение фактора; 0 — среднее значение фактора; -1 — низкое значение фактора.

Матрица планирования эксперимента, значения факторов в натуральном масштабе и в безразмерной системе координат, а также результаты эксперимента и рассчитанные значения исследуемой величины представлены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования и реализация полного факторного эксперимента

| № опыта | Факторы в натуральном масштабе | | Факторы в безразмерной системе координат | | | | Исследуемая величина | | |
|---------|--------------------------------|--------|--|-------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| | | | | | | | Из эксперимента | Из полного уравнения | Из упрощенного уравнения |
| | z_1 | z_2 | x_1 | x_2 | $x_1^2 - \frac{2}{3}$ | $x_2^2 - \frac{2}{3}$ | y | \hat{y} | $\hat{y}_{\text{упр}}$ |
| 1 | 200 | 0,0020 | -1 | -1 | 1/3 | 1/3 | 11,6 | 11,00 | 10,96 |
| 2 | 200 | 0,0025 | -1 | 0 | 1/3 | -2/3 | 16,4 | 17,61 | 17,57 |
| 3 | 200 | 0,0030 | -1 | +1 | 1/3 | 1/3 | 26,9 | 26,30 | 26,26 |
| 4 | 400 | 0,0020 | 0 | -1 | -2/3 | 1/3 | 22,3 | 22,31 | 22,31 |
| 5 | 400 | 0,0025 | 0 | 0 | -2/3 | -2/3 | 31,34 | 31,30 | 31,30 |
| 6 | 400 | 0,0030 | 0 | +1 | -2/3 | 1/3 | 42,4 | 42,37 | 42,37 |
| 7 | 600 | 0,0020 | +1 | -1 | 1/3 | 1/3 | 33,1 | 34,70 | 34,66 |
| 8 | 600 | 0,0025 | +1 | 0 | 1/3 | -2/3 | 46,3 | 45,07 | 45,03 |
| 9 | 600 | 0,0030 | +1 | +1 | 1/3 | 1/3 | 57,9 | 58,52 | 58,48 |

С целью приведения матрицы планирования эксперимента к ортогональному плану квадратичные столбцы x_j^2 были преобразованы с использованием следующего линейного преобразования [3]:

$$x'_j = x_j^2 - \bar{x}_j^2 = x_j^2 - \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 / N = x_j^2 - 6/9 = x_j^2 - 2/3, \quad (2)$$

где $N = 9$ — количество опытов в эксперименте.

Так как матрица планирования является ортогональной, то все коэффициенты уравнения регрессии (1) определяются независимо друг от друга по формуле

$$b_j = \sum_{i=1}^N x_{ji}y_i / \sum_{i=1}^N x_{ji}^2. \quad (3)$$

Например, для определения коэффициента b_1 при x_1 необходимо получить сумму произведений столбца с x_1 в безразмерной системе координат на столбец с y . Затем находим значение b_1 :

$$b_1 = \sum_{i=1}^9 x_{1i}y_i / \sum_{i=1}^9 x_{1i}^2 = 82,4 / 6 = 13,73.$$

Аналогично были определены эффекты единичных, двойных и квадратичных взаимодействий: $b'_0 = 32,02$; $b_2 = 10,03$; $b_{12} = 2,38$; $b_{11} = 0,04$; $b_{22} = 1,04$.

Дисперсии коэффициентов уравнения (1) определяются по формуле

$$s_{b_j}^2 = s_{\text{воспр}}^2 / \sum_{i=1}^N x_{ji}^2. \quad (4)$$

В результате расчетов по матрице с преобразованными столбцами для квадратичных эффектов получается уравнение следующего вида:

$$\hat{y} = b'_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}(x_1^2 - \bar{x}_1^2) + b_{22}(x_2^2 - \bar{x}_2^2). \quad (5)$$

Для перехода к обычной записи b_0 определяется по формуле

$$b_0 = b'_0 - b_{11}\bar{x}_1^2 - b_{22}\bar{x}_2^2 = 32,02 - 0,04(2/3) - 1,04(2/3) = 31,3 \quad (6)$$

и оценивается с дисперсией, равной

$$s_{b_0}^2 = s_{b'_0}^2 + (\bar{x}_1^2)^2 s_{b_{11}}^2 + (\bar{x}_2^2)^2 s_{b_{22}}^2. \quad (7)$$

С целью определения дисперсии воспроизводимости $s_{\text{воспр}}^2$, знание которой необходимо для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии, в центре плана были поставлены дополнительно три параллельных опыта и получены следующие значения y :

$$y_1^0 = 39,37; y_2^0 = 39,22; y_3^0 = 39,85; \bar{y}^0 = \sum_{u=1}^3 y_u^0 / 3 = 39,48;$$

$$s_{\text{воспр}}^2 = \sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2 / 2 = 0,108; s_{\text{воспр}}^2 = 0,329.$$

Затем с использованием выражений (4) и (7) были оценены дисперсии всех коэффициентов уравнения регрессии, которые оказались равными:

$$s_{b'_0}^2 = 0,06; s_{b_1}^2 = s_{b_2}^2 = 0,018; s_{b_{12}}^2 = 0,027; s_{b_{11}}^2 = s_{b_{22}}^2 = 0,054.$$

Значимость всех коэффициентов уравнения регрессии оценивается по критерию Стьюдента.

Для этого по формуле $t_j = |b_j| / \sqrt{s_{b_j}^2}$ рассчитывается t -отношение:

$$t_0 = 127,8; t_1 = 102,5; t_2 = 74,9; t_{12} = 14,5; t_{11} = 0,2; t_{22} = 4,5.$$

Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости $p = 0,05$ и числа степеней свободы $f = 2$ $t_{0,05}(2) = 4,3$. Так как t -отношение для коэффициента b_{11} оказалось меньше табличного значения, то коэффициент является незначимым и его можно исключить из уравнения регрессии. Все остальные коэффициенты являются значимыми и их нельзя исключать из уравнения. После исключения незначимого коэффициента уравнение регрессии будет иметь следующий вид:

$$\hat{y} = 31,3 + 13,73x_1 + 10,03x_2 + 2,38x_1x_2 + 1,04x_2^2. \quad (8)$$

Проверим адекватность полученного уравнения по критерию Фишера:

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2,$$

здесь

$$s_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - l) = 0,0096 / 4 = 0,0024,$$

где l — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии, равное 5.

Тогда $F = 0,0024 / 0,108 = 0,022$. Табулированное значение критерия Фишера для $p = 0,05$, $f_1 = 5$, $f_2 = 2$, $F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,3$. Так как $F < F_{1-p}(f_1, f_2)$, то полученное уравнение регрессии (8) адекватно описывает эксперимент.

Следовательно, полученная математическая модель может быть использована для оценки влияния расхода активного потока модельного газа и исходной концентрации в нем диоксида серы на конечную концентрацию диоксида серы, получаемую в результате использования предложенного струйного аппарата.

Список литературы

1. Туркин А. В. Снижение загрязнения атмосферы очисткой продуктов сгорания судовых и корабельных энергетических установок / А. В. Туркин // Материалы VII регион. науч.-техн. конф. — Новороссийск: МГА, 2008.
2. Комиссаров К. Б. Комплексная очистка дымовых газов теплогенерирующих установок: моногр. / К. Б. Комиссаров, С. А. Лутков, А. В. Филь — Ростов н/Д: Филиал МГА имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2007. — 134 с.
3. Ахназарова С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. — М.: Высш. Шк., 1978. — 319 с.
4. Рамм В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. — М.: Химия, 1976. — 655 с.
5. Дьяконов Г. К. Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов / Г. К. Дьяконов. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 349 с.

УДК 502.7:627.215.2

Е. Г. Трунин,
канд. экон. наук,
ФАУ «Российский речной регистр»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ В РЕЧНЫХ ПОРТАХ

PREDICTION OF ENVIRONMENTAL POLLUTION WHEN ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN RIVER PORTS

В статье рассматривается вопрос краткосрочного прогнозирования загрязнения окружающей среды. Показана возможность применения для решения этого вопроса аппарата искусственных нейронных сетей.

In article considers the question of short-term forecasting of environmental pollution. The possibility to apply for a decision on this question of the apparatus of artificial neural networks is shown.