

## РАСЧЕТ ВЫСОТЫ ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЛОЯ В АППАРАТЕ С ПРОВАЛЬНЫМИ ТАРЕЛКАМИ БОЛЬШИХ ОТВЕРСТИЙ

*И.С. Козий, ассистент;*

*Л.Л. Гурец, канд. техн. наук, доцент;*

*А.А. Чаплыгин, аспирант,*

*Сумский государственный университет, г. Сумы*

*Проведено моделирование методом уравнений регрессий, которые адекватно описывают зависимость высоты газожидкостного слоя от ряда факторов - плотности орошения жидкостью, скорости газа в аппарате и свободного сечения полотна тарелки.*

**Ключевые слова:** *очистка газа, провальная тарелка, загрязненная среда.*

*Проведене моделювання методом рівнянь регресій, які адекватно описують залежність висоти газорідного шару від ряду факторів - щільності зрошення рідини, швидкості газу в апараті й вільного перерізу полотна тарілки.*

**Ключові слова:** *очистка газу, провальна тарілка, забруднене середовище.*

### ВВЕДЕНИЕ

При работе аппаратов с провальными тарелками больших отверстий (ПТБО) на полотне тарелки возникают высокие газожидкостные слои, что способствует повышению эффективности пылеулавливания. На высоту слоя влияют следующие факторы - плотность орошения жидкостью, скорость газа в аппарате и свободное сечение полотна тарелки. Большое количество факторов, влияющих на высоту слоя, приводит к необходимости математического моделирования с целью выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров процесса.

Построение детерминированной математической модели процессов, которые приводят к возникновению газожидкостного слоя, наталкивается на значительные трудности, связанные с необходимостью учета множества различных факторов, но построение такой модели необходимо как для конструирования аппарата, так и для расчета оптимальных режимов работы, при которых достигается высокая эффективность очистки газовых выбросов. Поэтому для расчета искомых величин воспользуемся специализированными программными продуктами, такими как Mathcad 14.0 и Statistica 6.0.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Построение регрессионной модели расчета высоты газожидкостного слоя и как следствие эффективности пылеулавливания в аппарате с провальными тарелками больших отверстий, её дальнейшее использование для анализа параметров и оптимизации конструкции аппарата, режимов его работы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При обработке экспериментальных данных оперируем случайными величинами, которые имеют нормальное (Гауссовское) распределение. При этом различные случайные величины, которые рассматриваются в эксперименте, имеют конечные дисперсии и дисперсии случайных величин, не являются слишком большими по сравнению друг с другом, что дает право считать справедливой центральную предельную теорему математической статистики.

Для того чтобы при построении эмпирических зависимостей с наибольшей эффективностью использовать статистические методы и

корректно анализировать полученные результаты, необходимо провести предварительную обработку результатов измерений и наблюдений [1-3]. Её содержание состоит в отсеивании грубых погрешностей и оценке достоверности результатов измерений. Важным моментом в предварительной обработке данных является проверка соответствия результатов измерений нормальному закону распределения.

Перед разработкой плана эксперимента на основе априорной информации были выявлены факторы, которые влияют на эффективность работы газоочистного аппарата. К числу таких факторов относятся:

$L$  - плотность орошения,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

- свободное сечение тарелки, %;

$w$  - скорость газа в аппарате,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$H$  - высота слоя пены (газожидкостной смеси),  $\text{м}$ ;

$K$  - количество удерживаемой жидкости в аппарате во время его работы,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ .

Поиск зависимости между факторами проводим с использованием методов и процедур регрессионного анализа [4]. При этом отметим, что основная задача состоит в том, чтобы по наблюдениям входных ( $L, w, \dots$ ) и выходных ( $H, K$ ) параметров выполнить:

- построение регрессионной модели (уравнения регрессии);
- построить доверительные интервалы для коэффициентов модели;
- проверить гипотезу о значимости регрессии;
- оценить степень адекватности модели.

Поскольку при проведении эксперимента в каждом конкретном опыте имелась возможность задавать любое значение для факторов  $L, w$  и  $\dots$ , то их относим к группе контролируемых и управляемых. Тогда как факторы  $H$  и  $K$  следует отнести к группе контролируемых и неуправляемых, поскольку задавать их определенное значение было невозможно [2].

Можно утверждать, что величины  $H$  и  $K$  являются откликами, т.е. наблюдаемыми случайными переменными, по предположению зависящих от контролируемых управляемых факторов  $L, w$  и  $\dots$ .

Таким образом, имеем право разделить переменные на две группы: независимые, управляемые переменные (предикторы) и зависимые (отклики) (рисунок 1).

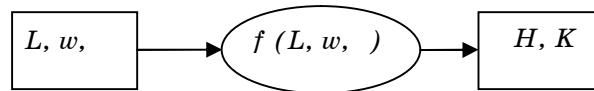


Рисунок 1 – Схема связи независимых и зависимых переменных

В результате натурального эксперимента необходимо найти зависимости между откликами и предикторами – функцию отклика. Поскольку уровни факторов в каждом опыте задаются произвольным образом, то имеет место активный эксперимент, целью которого является определение функции отклика в виде [4]:

$$M_y = f(x_i) + \varepsilon_\sigma, \quad (1)$$

где  $M$  – математическое ожидание отклика;

$x_i$  – контролируемые, управляемые факторы;

$\sigma$  – ошибка эксперимента, учитывающая влияние неконтролируемых факторов.

Положение факторов ( $L, w, \dots$ ) и откликов ( $H, K$ ) при проведении эксперимента представлено на рисунке 2.

Для выявления влияния каждого из трех управляемых факторов ( $L$ ,  $w$ ,  $\tau$ ) примем диапазоны изменений такими, чтобы охватить все возможные варианты (таблица 1).

Таблица 1 – Диапазоны изменений факторов

Уровень фактора	$L$ , $\text{м}^3/\text{м}^2$	$w$ , $\text{м}/\text{с}$	$\tau$ , %
Min	9	0,56	8,5
Max	20	3,44	23,5

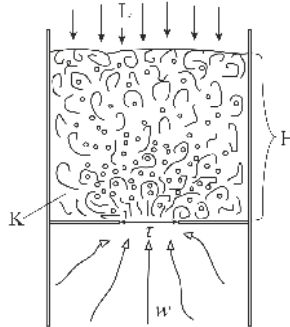


Рисунок 2 – Положение предикторов и откликов при проведении эксперимента

Исходя из того, что критерием эффективности работы газоочистного аппарата является прежде всего его пылеулавливающие характеристики, то исследуем зависимость степени очистки от плотности орошения и скорости газа в сечении аппарата ( $w$ ). Исходя из полученных экспериментальных данных, устанавливаем пропорциональную зависимость между эффективностью пылеочистки и плотностью орошения, для разных скоростей подачи газа при рабочем режиме аппарата.

Опираясь на экспериментальные данные работы газоочистного аппарата, можно проследить зависимость между степенью очистки для каждого режима работы аппарата и значением высоты столба газожидкостной смеси в процессе работы. При этом следует отметить, что количество удерживаемой жидкости  $K$  в процессе установившейся работы аппарата должно быть оптимальным, исходя из принципов ресурсосбережения.

Основываясь на вышесказанном, дальнейшее исследование эффективности работы газоочистного аппарата в большей степени связываем с величиной высоты столба газожидкостной смеси на тарелке, поиск функции отклика для которой и будем проводить.

Учитывая тот факт, что линейная модель зависимости переменных не достаточно соответствует исследуемым процессам (диаграммы рассеивания  $H(\tau, w)$ ,  $H(L, w)$  и  $K(\tau, w)$  также объясняют нелинейность связи (рисунки 3 – 5)), то поиск регрессионной зависимости будем осуществлять с использованием предположения о полиномиальной зависимости между откликами и предикторами [2, 5]. Точки на построенных поверхностях обозначают значения искомых величин, полученные экспериментальным путем.

Поэтому представим гипотетическую зависимость между  $H$  и  $L$ ,  $w$ ,  $\tau$  в виде

$$H = f(L^2, \tau^2, w^2, L \cdot \tau, L \cdot w, \tau \cdot w, L, \tau, w). \quad (2)$$

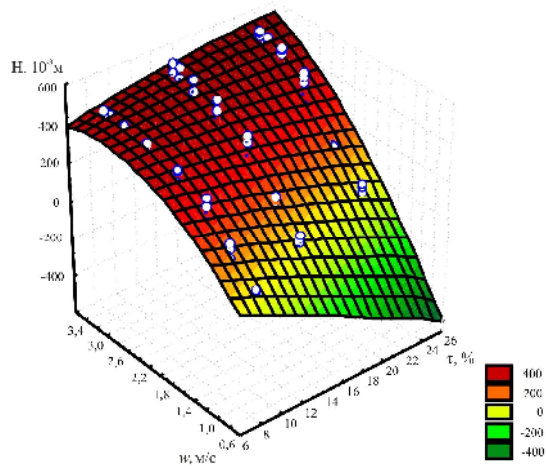


Рисунок 3 – Зависимость высоты газожидкостного слоя от свободного сечения и скорости газа в аппарате

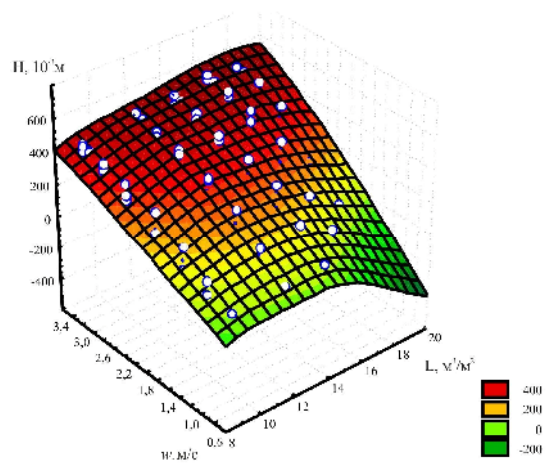


Рисунок 4 – Зависимость высоты газожидкостного слоя от плотности орошения и скорости газа в аппарате

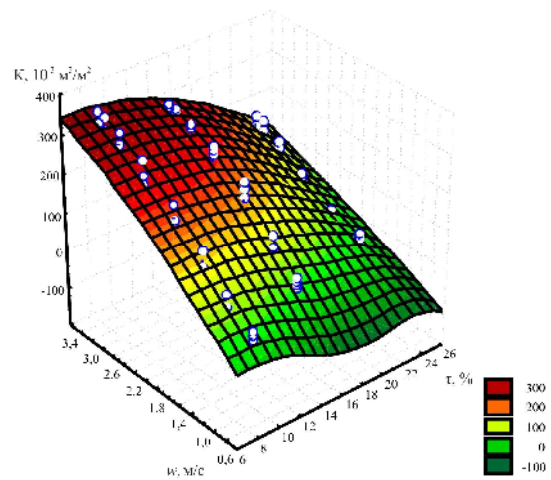


Рисунок 5 – Зависимость количества удерживаемой жидкости от свободного сечения и скорости газа в аппарате

Таким образом, строится нелинейная регрессионная модель. Для её построения выполняем линеаризующие преобразования (таблица 2).

Таблица 2 – Линеаризующие преобразования

$H$	$L^2$	$w^2$	$L \cdot w$	$L$	$w$
$H_k$	$L_k^2$	$w_k^2$	$L_k \cdot w_k$	$L_k$	$w_k$

После чего строится линейная регрессионная модель относительно уже новых преобразованных переменных.

Качество построенной регрессии будем измерять опираясь на значение коэффициента детерминации  $R^2$  как степени соответствия регрессионной модели к фактическим данным [4].

Построенная модель нелинейной регрессии имеет вид

$$H = -293,98 - 0,95L^2 + 33,07L - 76,19w^2 + 342,9w - 0,38\tau^2 - 25,72\tau + 2,21L \cdot w - 0,06L \cdot \tau + 12,24w \cdot \tau. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации  $R^2=0,965$ . Стандартные ошибки коэффициентов регрессии и их уровень значимости показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Стандартные ошибки коэффициентов регрессии и их уровень значимости

Переменная	Стандартная ошибка	Уровень значимости
$L$	15,46	0,0366
$w$	6,09	0,0001
$L_k$	40,46	0,0000
$w_k$	0,65	0,1517
$k$	8,42	0,0000
$L_w$	0,17	0,0269
$L$	1,88	0,2441
$w$	0,28	0,8406
$w$	1,02	0,0000

Регрессия построена для уровня значимости  $\alpha=0,05$ .

Так как выделяемый уровень значимости для коэффициентов регрессии составляет  $\alpha=0,05$ , то те предикторы, для которых их уровень значимости превышает выделяемый, являются незначимыми [1]. Таковыми являются предикторы  $L_k$ ,  $L_w$ ,  $L$ . Поэтому их можно из рассмотрения исключить и строить регрессию только для тех переменных, которые являются значимыми, для обеспечения оптимальной аналитической зависимости имеют новую регрессию:

$$H = -189,72 + 13,54L - 0,399\tau^2 - 27,37\tau - 76,22w^2 + 365,53w + 12,61w \cdot \tau. \quad (4)$$

У этой регрессии все коэффициенты являются значимыми.

Итоговые статистики регрессионного анализа: коэффициент детерминации  $R^2=0,962$  обозначает, что построенная регрессия высоко значимая [1].

О том, что регрессия высоко значимая, говорит значение критерия Фишера  $F=263,82$  при уровне значимости  $\alpha<0,0000$ .

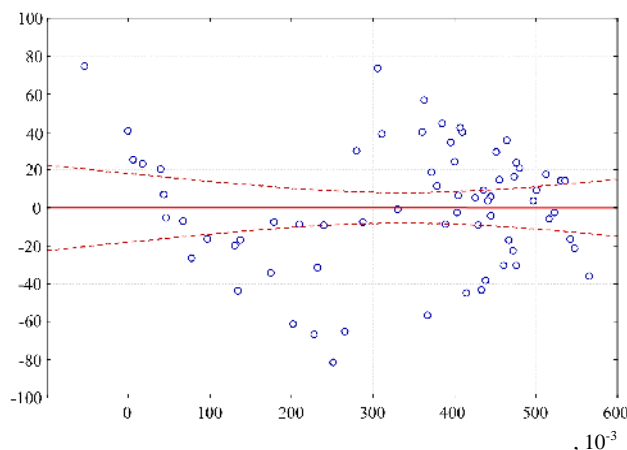
Уровень значимости для коэффициентов модели при соответствующих переменных приведен в таблице 4:

Таблица 4 – Уровень значимости коэффициентов модели

Переменная	Уровень значимости	Переменная	Уровень значимости
$L$	0,0000	$w_k$	0,0000
	0,0001	$k$	0,0186
$w$	0,0000	$w$	0,0000

Все коэффициенты значимые, так как для каждого из них уровень значимости  $p < 0,05$ .

Важным элементом является оценка адекватности модели. Анализ адекватности основывается на анализе остатков. Для этого воспользуемся визуальным методом [1] (рисунок 6).



6 –

Из рисунка 6 видно, что остатки хаотично разбросаны на плоскости и в их поведении закономерности нет. Нет основания говорить, что остатки коррелированы между собой, следовательно, можно сделать вывод, что регрессионная модель достаточно адекватно описывает данные.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенного многофакторного эксперимента получено квадратические уравнения регрессии, которые позволяют адекватно описывать зависимость значений высоты газожидкостного слоя от основных параметров влияния: плотности орошения жидкости, скорости газа в аппарате и свободного сечения полотна тарелки.

## SUMMARY

### CALCULATION OF HEIGHT GAS-LIQUID LAYER IN THE DEVICE WITH LARGE-HOLE SIEVE TRAYS

*I.S. Koziy, L.L. Gurets, A.A. Chaplygin,*  
Sumy State University, Sumy

Modelling by a method of the equations of regresses which adequately describes dependence of the height of gas-liquid layer from a number of factors – density of refluxing, speed of gas in the device and free section in a tray.

**Key words:** gas treating, sieve tray, polluted environment.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере для профессионалов / В. Боровиков. – СПб.: Питер, 2003. – 688с.
2. Грешилов А.А. Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. – М.: Радио и связь, 1997. – 112с.
3. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816с.
4. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: учебное пособие / В.Б. Шашков. - Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. - 363с.
5. Пляцук Л.Д. Експериментальні дослідження гідродинаміки провальних тарілок великих отворів / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, І.С. Козій // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. - 2009. - №1. – С. 61-66.

20 2010 .