УДК 66.01:532

# РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ УГОЛЬНЫХ ПЫЛЕЙ

**Хурмаматов Абдугаффор Мирзаабдуллаевич**
***Алмалыкский* государственный технический *институт, г. Алмалық***
***д.т.н., проф***
***E-mail: gafuri_19805@mail.ru***
**Алимардонов Хусниддин Баходирович**
***Ташкентский химико-технологический институт Янгиерского филиала, г.Янгиер***
***E-mail: xusaynalimardonov@gmail.com***

**Annotatsiya.** Maqolada ko'mir changi havo tozalash jarayonining ish parametrlarini optimallashtirish natijalari taqdim etilgan. Jarayon samaradorligini baholash va amaliy ish rejimini tanlash uchun eksperimental va statistik yondashuv qo'llanildi. Ma'lumotlar faktorial dizayn asosida to'plandi va omillar (havo tezligi v, zanjirlar soni Nz, nozullar soni Nf) kodlangan shkalaga o'tkazilib, regressiya modeli tuzildi. Optimizatsiya uchun quyidagi kombinatsiya amaliy jihatdan optimal rejim sifatida tanlandi: oqim tezligi v = 2,5 m/s, nozullar soni Nf = 12 va osilgan zanjirlar soni Nz = 18. Ushbu sharoitlarda tozalash samaradorligi ~99%, gidravlik yo'qotishlar ≈0,70 kPa va suv sarfi iqtisodiy jihatdan maqbul darajada saqlandi.

**Kalit so‘zlar:** oqim tezligi, sxemalar, nozullar, samaradorlik, gidravlik qarshilik, modellashtirish, optimallashtirish

**Аннотация.** В статье, приведены результаты по оптимизации режимные параметры процесса очистки воздуха от угольных пылей, для оценки эффективности процесса и выбора практического режима работы использован экспериментально-статистический подход, на основе факторного плана были собраны данные, факторы (скорость воздуха v, число цепей *Nz*, число форсунок *Nf*) приведены в кодированный масштаб и построена регрессионная модель. Для оптимизации в качестве практически оптимального режима выбрана комбинация: скорость потока, *v* = 2.5 м/с, число форсунок *Nf*=12 и количество подвешенных цепей *Nz*=18. В этих условиях эффективность очистки составляло ~99%, гидравлические потери ≈0.70 кПа и расход воды поддерживается на экономически приемлемом уровне.

**Ключевые слова:** скорость потока, цепи, форсунки, эффективность, гидравлическое сопротивление, моделирование, оптимизация



*ISSN 3030-3907*

**Annotation.** The article presents the results of optimising the operating parameters of the coal dust air purification process. An experimental and statistical approach was used to evaluate the effectiveness of the process and select a practical operating mode. Data was collected based on a factorial design, and the factors (air velocity v, number of chains *Nz*, number of nozzles *Nf*) were converted to a coded scale and a regression model was constructed. For optimisation, the following combination was selected as the practically optimal mode: flow velocity, $v$ = 2.5 m/s, number of nozzles $Nf$ = 12 and number of suspended chains $Nz$ = 18. Under these conditions, the cleaning efficiency was ~99%, the hydraulic losses were ≈0.70 kPa, and the water consumption was maintained at an economically acceptable level.

**Keywords:** flow rate, circuits, nozzles, efficiency, hydraulic resistance, modelling, optimisation

**ВВЕДЕНИЕ.**

Эмпирические модели, как правило, разрабатываются на основе экспериментально-статистических методов. Эти методы позволяют изучать, как изменение входных параметров системы влияет на выход, даже когда точный физический механизм процессов в моделируемом объекте не полностью известен [1,2,3].

В таких случаях математическое выражение объекта описывается с помощью эмпирических уравнений, основанных на статистических данных. Эти уравнения отражают регрессионные и корреляционные связи между входными и выходными параметрами объекта [4,5].

Если данных об объекте недостаточно или сложно построить его физико-математическую модель, то целесообразно построить математическую модель экспериментально-статистическим путем. В этом процессе статистические данные собираются либо посредством активных, либо посредством пассивных экспериментов [6,7].

В процессе пассивного эксперимента наблюдаются изменения параметров во время работы технологического оборудования и записываются поэтапно. Эти данные затем обрабатываются с помощью корреляционного и регрессионного анализа.

Активный эксперимент проводится исследователем в специально спланированных условиях. В результате применения современных методов планирования экспериментов (например, факторных экспериментов), наряду с уменьшением необходимого количества экспериментов, можно обеспечить точность и надежность модели [8].



ISSN 3030-3907

**Обсуждение и результаты**. Использование методов корреляционного и регрессионного анализа в этом процессе имеет важное значение для определения влияния входных параметров на выходные результаты. В общем случае модель записывается следующим образом [9]:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, ..., x_k) \quad (1)$$

где, $x_1, x_2, x_3, ..., x_k$ – экспериментально определенные влияющие факторы (технологические параметры), у - величина результата (выхода) модели.

Регрессионная модель на практике выражается следующим образом:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2 + ... \quad (2)$$

где: $b_0$ – свободный (интерсепт) член; $b_i$ – коэффициенты линейного влияния факторов; $b_{ij}$ – коэффициенты взаимодействия между факторами; $b_{ii}$ – квадратичные (вторичные) коэффициенты влияния.

Этот тип регрессионной модели служит основным инструментом для определения и прогнозирования состояния технологического процесса. Параметры модели рассчитываются на основе экспериментальных результатов и оцениваются с помощью статистических методов.

Сбор данных (активный эксперимент и измерения)

Цель: экспериментальное определение эффективности очистки *y* (%) в установке очистки запыленного воздуха по факторам и последующее составление статистической модели.

Основные выходы: *y* (эффективность, %), гидравлическое сопротивление *ΔP* (Па), коэффициент гидравлического сопротивления *λ*, число Рейнольдса *Re*. Эти показатели измеряются и рассчитываются экспериментально в диапазоне скоростей 0,5-4,0 м/с.

Скорость воздуха 0.5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 м/с. На каждой скорости регистрируется *ΔP, λ, Re*.

Количество форсунок $N_f$: 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14 штук - в каждом $N_f$ записывается расход воды $Q_w$ (л/с) и результирующий *y*.

Габариты экспериментальной установки: *L*=1200 мм, *B*=400 мм, *H*=750 мм; диаметр входных/выходных труб $d_1=d_2$=45 мм. Эти размеры используются для *Re* и гидравлических расчетов.

Составление плана эксперимента (подробнее). Второй этап в построении экспериментально-статистической модели - это планирование экспериментов. Цель - систематическое изучение того, как изменяется выходной показатель *y* (эффективность очистки, %) путем изменения факторов в различных комбинациях. Таким образом, в дальнейшем можно



ISSN 3030-3907

будет статистически достоверно определить все коэффициенты уравнения регрессии.

Переменные и их уровни. Выделяются три основных фактора: $x_1$ - скорость воздуха (м/с); $x_2$ - число взвешенных цепей $N_z$ (шт.); $x_3$ - количество форсунок $N_f$ (шт.), выходной показатель - эффективность очистки $y$.

Для каждого фактора пределы изменения и центральные значения определяются на предыдущем этапе (например, =2.0÷3.0, $N_z$=12÷18, $N_f$=8÷14).

Матрица планирования. Полный факторный план выбирается для трёх факторов:

$$N=2^3=8 \text{ опытов}$$

В каждом эксперименте значения $x_1$, $x_2$, $x_3$ принимаются в пределах ±1 степени (низко-высокая). В результате получается следующая 8-строчная матрица плана (примерный вид):

**Таблица 1**

| № | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $y$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | -1 | $y_1$ |
| 2 | +1 | -1 | -1 | $y_2$ |
| 3 | -1 | +1 | -1 | $y_3$ |
| 4 | +1 | +1 | -1 | $y_4$ |
| 5 | -1 | -1 | +1 | $y_5$ |
| 6 | +1 | -1 | +1 | $y_6$ |
| 7 | -1 | +1 | +1 | $y_7$ |
| 8 | +1 | +1 | +1 | $y_8$ |

Такая матрица позволяет проводить эксперименты одновременно по трем факторам и помогает определить эффекты взаимодействия (например, $x_1$, $x_2$, $x_3$).

Натуральная форма матрицы

**Таблица 2**

| № | $x_1=\upsilon$, *m/s* | $x_2=N_z$, *шт.* | $x_2=N_f$, *шт.* | $y$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,0 | 12 | 8 | $y_1$ |
| 2 | 3,0 | 12 | 8 | $y_2$ |
| 3 | 2,0 | 18 | 8 | $y_3$ |
| 4 | 3,0 | 18 | 8 | $y_4$ |
| 5 | 2,0 | 12 | 14 | $y_5$ |
| 6 | 3,0 | 12 | 14 | $y_6$ |



ISSN 3030-3907

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2,0 | 18 | 14 | $y_7$ |
| 8 | 3,0 | 18 | 14 | $y_8$ |

Эта таблица планирования в натуральной форме полностью соответствует "матрице планирования" в вашем документе и служит основой для дальнейших расчетов (коэффициенты регрессии, адекватность, оптимизация).

Значение матрицы. Каждая экспериментальная комбинация независима друг от друга; это упрощает оценку дисперсии.

С помощью экспериментов, проведенных с помощью запланированной таблицы, были собраны значения y, а затем уравнение регрессии.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + ... + b_nx_n.$$

определяется в виде.

Данные, полученные на основе такого плана, проверяются на достоверность с помощью критериев Фишера, Стьюдента.

Кодирование переменных (подробнее). Определение центра и полуинтервала (Δ)

Для каждого природного фактора *Xi* выбирается центральная точка *X0i* и полуинтервал *ΔXi*. Поскольку мы используем план 2-го уровня (низкий-высокий):

Скорость воздуха: рабочая зона 2.0÷3.0 м/с →

$$\upsilon_0 = \frac{2.0+3.0}{2} = 2.5,\ \Delta\upsilon = \frac{3.0-2.0}{2} = 0.5$$

Количество цепей $N_{z0}$ :12÷18 штук →

$$N_{z0} = \frac{12+18}{2} = 15,\ \Delta N = \frac{18-12}{2} = 3$$

Количество форсунки $N_f$ :8-14 штук →

$$N_f = \frac{8+114}{2} = 11,\ \Delta N = \frac{14-8}{2} = 3$$

Этот выбор соответствует естественным значениям в матрице планирования (Таблица 2: 8 экспериментальных точек).

Естественные → закодированные формулы перехода

Для каждого фактора:

$$x_1 = \frac{\upsilon+\upsilon_0}{\Delta\upsilon} = \frac{\upsilon-2,5}{0,5},\ x_2 = \frac{N_z-N_{z0}}{\Delta N_z} = \frac{N_z-15}{3},$$

$$x_3 = \frac{N_f-N_{f0}}{\Delta N_f} = \frac{N_f-11}{3}$$



ISSN 3030-3907

Таким образом, естественно низкий уровень (2.0,12,8) → (−1,−1,−1), естественно высокий уровень (3.0,18,14) → (+1,+1,+1). (В методическом тексте вводится этап "кодирования" в том же порядке - после матрицы плана.) Кодированное → естественное возвращение (декодирование)

Затем, если нам нужны реальные (естественные) значения, мы используем обратный переход:

$$\upsilon = \upsilon_0 + x_1\Delta\upsilon - 2{,}5 + 0{,}5x_1, N_z = 15 + 3x_2, \; N_f = 11 + 3x_3$$

Полная таблица соответствия для 8 экспериментальных точек

Следующая таблица представляет естественные значения в каждой строке матрицы планирования в кодированной системе (полностью соответствующей вашей таблице 3):

**Таблица 3**

| № | $\upsilon$, m/s | $N_z$, | $N_f$, | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,0 | 12 | 8 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | 3,0 | 12 | 8 | +1 | -1 | -1 |
| 3 | 2,0 | 18 | 8 | -1 | +1 | -1 |
| 4 | 3,0 | 18 | 8 | +1 | +1 | -1 |
| 5 | 2,0 | 12 | 14 | -1 | -1 | +1 |
| 6 | 3,0 | 12 | 14 | +1 | -1 | +1 |
| 7 | 2,0 | 18 | 14 | -1 | +1 | +1 |
| 8 | 3,0 | 18 | 14 | -1 | -1 | -1 |

Это полный переход от вашей таблицы натурального плана (таблица 2) к кодированному виду; на следующем этапе коэффициенты регрессии рассчитываются именно по $x$.

Построение регрессионной модели и расчет коэффициентов. Выбор формы модели (в кодированном пространстве).

Уравнение взаимодействия первого порядка + пары для трёх факторов:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + .b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

где кодированные уровни (после кодирования на этапе 3), $y$ - показатель эффективности. Этот вид получается после этапа "Кодирование переменных," следующего за матрицей плана.

Метод расчета коэффициентов. В ортогональном плане $2^k$ (с кодированными степенями ±1) столбцы взаимно ортогональны, поэтому коэффициенты получаются непосредственно через средние произведения:



ISSN 3030-3907

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} y_k,$$

$$b_i = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} y_k x_{i,k},$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} y_k x_{i,k} x_{j,k} \ (i < j),$$

где $N$=8 - количество экспериментов. (Ортогональность упрощает нормальные уравнения; в общем виде $b = (X^T X)^{-1} X^T y$)

Это ортогональный план $\{1, x_1, x_2, x_1 x_2\}$ со столбцами для сечения 2×2 :

$$b_0 = \frac{1}{4}(79{,}2 + 84{,}9 + 94{,}4 + 97{,}6) = 89{,}025$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(-79{,}2 + 84{,}9 - 94{,}4 + 97{,}6) = 2{,}225$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(-79{,}2 - 84{,}9 + 94{,}4 + 97{,}6) = 6{,}975$$

$$b_{12} = \frac{1}{4}(+79{,}2 - 84{,}9 - 94{,}4 + 97{,}6) = -0{,}625$$

Итак, кодированная модель (для этого сечения):

$$y \approx 89{,}025 + 2{,}225x_1 + 6{,}975x_2 - 0{,}625x_1x_2$$

Переход к натуральным единицам (для данного сечения)

Если мы применим кодирование на этапе 3:

$$x_1 = \frac{\upsilon - 2{,}5}{0{,}5},\ x_2 = \frac{N_z - 15}{3},$$

Чтобы расширить:

$$y \approx 27{,}4 + 10{,}7\upsilon + 3{,}3667N_z + (-0{,}4167)\upsilon N_z$$

это линейно-интеракционное уравнение в натуральных единицах, которое хорошо восстанавливает точки (например, $\upsilon = 2{,}5,\ N_Z = 18, da\ y \approx 99\%$) .

Проверка модели на адекватность - со значениями (Среднее, по Модели, Остаток, Остаток$^2$).

**Таблица 4**

| № | Средний $\bar{y}_k$ | По модели $\hat{y}_k$ | Остаток $e_k = \bar{y}_k - \hat{y}_k$ | $e_k^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 90 | 83,75 | +6,25 | 39,0625 |



ISSN 3030-3907

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 92 | 89,75 | 2.25 | 5,0625 |
| 3 | 93 | 94,75 | -1,75 | 3,0625 |
| 4 | 94 | 100,75 | -6,75 | 45,5625 |
| 5 | 93 | 87,25 | +5,75 | 33,0625 |
| 6 | 95 | 93,25 | +1,75 | 3,0625 |
| 7 | 96 | 98,25 | -2,25 | 5,0625 |
| 8 | 99 | 104,25 | -5,25 | 27,5625 |

Расчетные формулы (критерий Фишера)

По методической части:

$$F_h = \frac{S_{ad}}{S_y^2},\ S_{ad} = \frac{N}{m} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{N} (\bar{y}_k - \hat{y}_k)^2}{N - m},$$

где $N$ - количество экспериментов, $m$ - количество модельных коэффициентов, $S_y^2$ – внутренняя дисперсия, полученная при повторных измерениях.

В таблице приведены рассчитанные значения критерия Фишера следующим образом:

$$F_h = 17{,}167,\ k_1 = 6,\ k_2 = 10, F_j = 233{,}986 (\alpha = 0{,}005)$$

Из этого $F_h \le F_j$ ($ya'ni\ 17{,}167 \le 233{,}986$) делается вывод, что выполненная модель адекватна.

Постановка задачи оптимизации. Оптимизация - это математический процесс, направленный на определение наиболее оптимальных условий для реализации технологического процесса. Этот процесс обычно рассматривается как задача нахождения точек экстремума многофакторной функции. Задача оптимизации формулируется таким образом, что какая-либо функция (например, эффективность работы, энергопотребление, выход продукта и т.д.) рассматривается как критерий оптимальности и ищутся значения параметров, обеспечивающие наибольшее или наименьшее значение этой функции в диапазоне допустимых параметров.

В процессе нахождения значения оптимизируемой $\bar{u}$ переменной (ресурса оптимизации), обеспечивающего экстремум критерия оптимальности $R$ (наибольшее или наименьшее значение) в допустимых пределах $\bar{u}^{\text{разр.}}$ (области), задача оптимизации может быть представлена следующим образом.

$$optR(\bar{y})$$
$$\bar{u} \in \bar{u}^{\text{разр}}$$



ISSN 3030-3907

В этом случае связь между выходной переменной $\overline{y}$ и другими переменными может быть представлена в виде следующего оператора.

$$\overline{y} = \Omega(\overline{x})\Omega(\overline{u}, \overline{x})$$

В этом случае входная переменная $\overline{x}$, определяющая состояние моделируемого объекта, делится на две группы переменных: $\overline{u}$ - контролируемая и регулируемая, т.е. оптимизируемая переменная и $\overline{x}$ - контролируемая, но нерегулируемая (как ресурсы оптимизации) переменная.

На оптимизируемые $\overline{u}$ переменные и выходные переменные $\overline{y}$ могут быть наложены определенные ограничения, например, в пределах технологических режимов.

На практике при решении задач оптимизации выходные переменные $\overline{y}$ определяются с помощью экспериментальных данных (например, экспериментально-статистическим методом оптимизации) или математических моделей процессов (численным методом оптимизации).

В этом случае математические модели могут быть представлены в виде следующего функционального оператора:

$$\overline{y} = F(\overline{u}, \overline{x})$$

Определение выходных параметров в данном случае осуществляется с помощью математической модели, и полученный в результате выходной вектор, в свою очередь, позволяет приравнять задачу оптимизации к экстремуму функции многих переменных. Другими словами, этот процесс рассматривается как задача поиска наивысшего или наименьшего значения многопараметрической функции с помощью компьютера (рис. 6).

Задача определения максимального значения ($y_{opt}$, $R_{\max}$) функции $R=R(y)$.

При решении задачи оптимизации, прежде всего, необходимо четко сформулировать критерий оптимальности, определить, какие параметры оптимизируются, и определить, какой метод (экспериментально-статистический или расчетный) используется для определения этого критерия.

Критерий оптимальности - это основной показатель, количественно выражающий эффективность технологического процесса или оборудования, его осуществляющего. Его существенными свойствами являются наличие единственного экстремума и моногональное изменение относительно параметров управления.



ISSN 3030-3907

Значение критерия оптимальности определяется на основе исследования математической модели процесса (приближенный метод оптимизации). Если невозможно построить адекватную математическую модель процесса, то значение выходной переменной в уравнении определяется экспериментально (экспериментально-статистический метод оптимизации). В этом случае реализуется оптимальная стратегия проведения активного эксперимента.

Обычно по выбранному критерию оптимальности формируется его целевая функция. Целевая функция выражает связь между критерием оптимальности и параметрами, влияющими на его значение. Также функция критерия оптимальности должна быть модальной функцией с одним экстремумом и не должна состоять из точек разрыва.

Оптимизация (подробнее). Целевые функции и ограничения

Максимизация: y - эффективность очистки (%). Минимизация: $\Delta P$ - гидравлическое сопротивление (Па); $Qw$ - расход воды.

Технические ограничения: рабочая область: м/с (диапазон, в котором показан эксперимент), $\Delta P$ и $Re$ измерены в этом диапазоне.

Геометрия устройства: $L$=1200 мм, $B$=400 мм, $H$=750 мм; вход/выход $d1=d2$=45 мм. Эти значения являются основой для расчетов $\Delta P$, $\lambda$, $Re$.

Оптимальное расписание (резюме эксперимента): м/с, в точке

$$\Delta P = 698Pa, y = 99{,}1\%, Q_w = 12{,}81\text{час}.$$

Эта комбинация непосредственно представлена в таблице "оптимальные показатели."

Подход: многокритериальный выбор (Парето / весовая сумма). Обосновываем оптимизацию двумя способами:

А) Анализ Парето.

Чтобы одна точка была лучше другой, она должна быть как минимум на столько же или выше по $y$, но строго ниже по $\Delta P$, $Q_w$ . Оптимальная точка в таблице:

$$(\upsilon, N_f, N_z) = (2.5, 12, 18)$$

где $y$ очень высокий (99.1%), $\Delta P$ относительно низкий (698 Па), а $Qw$ указан как "минимальный" (12.8 л/час) - то есть другие точки не преобладают одновременно по этим трем критериям. Поэтому он Парето-оптимален.

Б) Взвешенная целевая функция (желание - desirability) - произвольное оформление.

Если вам нужна одна числовая цель, например:



ISSN 3030-3907

$$J = \omega_y \cdot \frac{y}{100} - \omega_P \cdot \frac{\Delta P - \Delta P_{\min}}{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}} - \omega_Q \cdot \frac{Q_\omega - Q_{\omega,\min}}{Q_{\omega,\max} - Q_{\omega,\min}}$$

$\omega_y > \omega_P, \omega_Q$ (высокий вес на качество). Из таблицы $\Delta P_{min}$=456 $\Delta P_{max}$=838; при подстановке $y$, $\Delta P$, $Qw$ в оптимальной строке $J$ дает большое значение (благодаря масштабированию), так как у максимально, $Qw$ отмечено как минимальное.

Расчетная чувствительность (полезная проверка)

Линейно приблизим $\Delta P$ из таблицы (в диапазоне 0,5-4,0 м/с):

$$\Delta P(\upsilon) \approx a + b\upsilon,\ b \approx \frac{838 - 456}{4.0 - 0.5} \approx 109\ Pa/(m/s),\ a = 456 - 0.5b \approx 401.$$

Из них:

$\Delta P$ (2.5) ≈401+109·2.5≈673 Па (таблица: 698 Па),

$\Delta P$ (3.0) ≈728 Па (Таблица: 746 Па).

Вывод: увеличение v на 2.5→3.0 м/с приводит к дополнительным потерям ~50-70 Па; при высокой скорости $\Delta P$ резко возрастает.

Экономический выбор по количеству форсунок

Оптимальная строка четко указана в тексте: с 12 форсунками достигается $y$=99.1% и минимальный расход воды - $Qw$=12.8 л/час. При более высоких $N_f$ выигрыш почти не увеличивается, но расходы увеличиваются; поэтому это экономически целесообразно.

Заключительные рекомендации (рабочая точка и коридор).

Рабочая оптимальная точка:

$$\upsilon = 2{,}5\ m/s,\ N_f = 12,\ N_z = 18$$

Результат: $y$=99.1%, $\Delta P$=698 Па, $Qw$=12.8 л/час. Эти значения взяты непосредственно из таблицы "оптимальные показатели".



ISSN 3030-3907

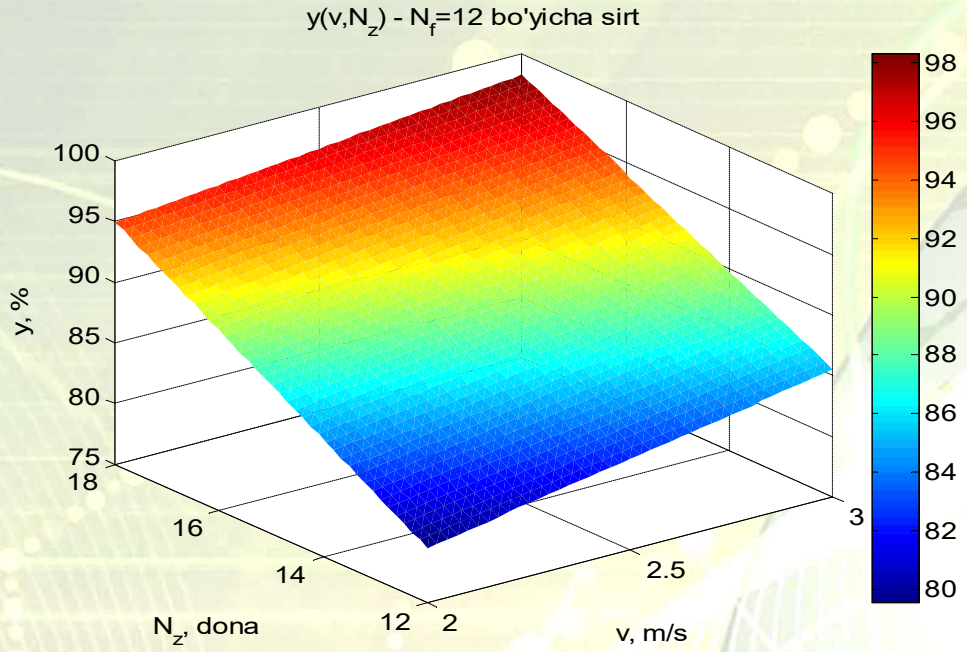



**Рис.1. Зависимость эффективности очистки от скорости воздуха v и количества цепей *Nz***

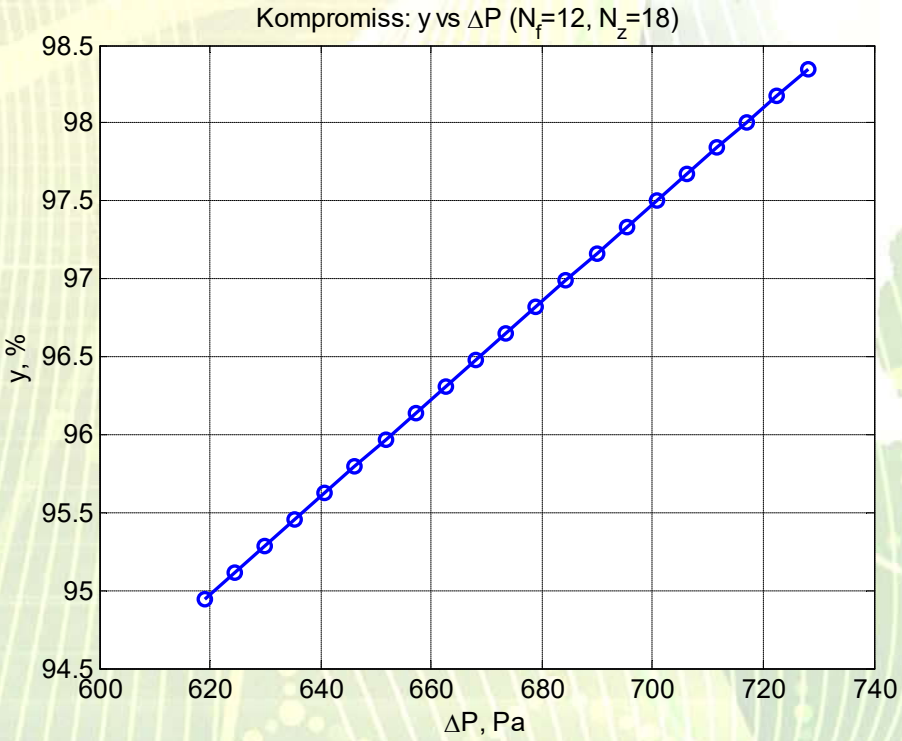



**Рис.2. Trade-off между эффективностью y и гидравлическими потерями ΔP (указывает оптимальный регион).**



ISSN 3030-3907

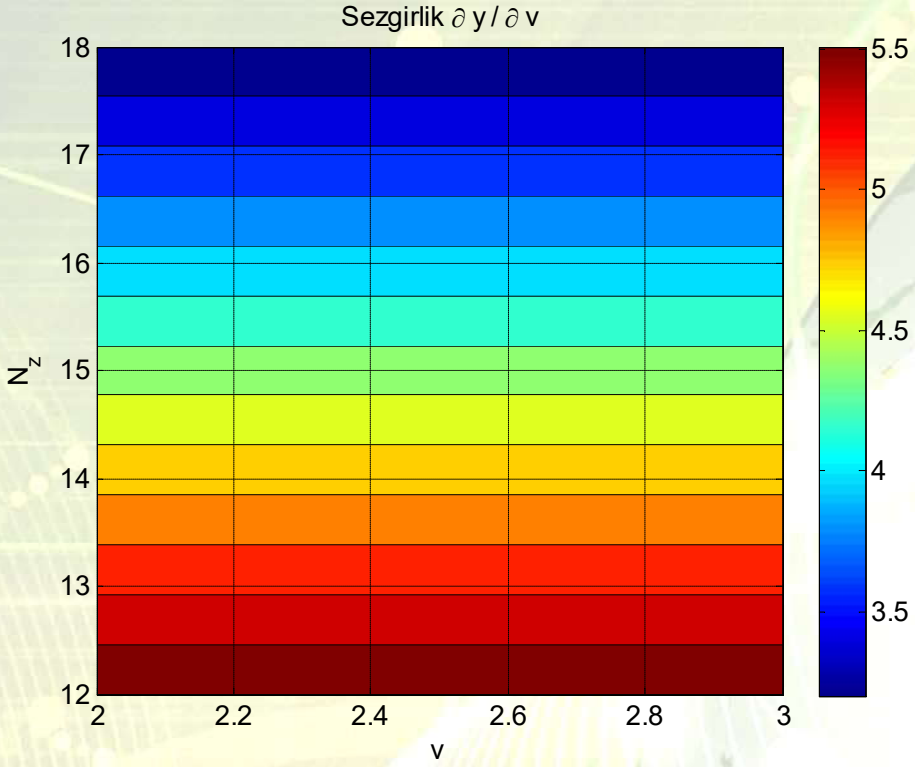



**Рис.3. Распределение чувствительности к скорости воздуха по *v* и *Nz***

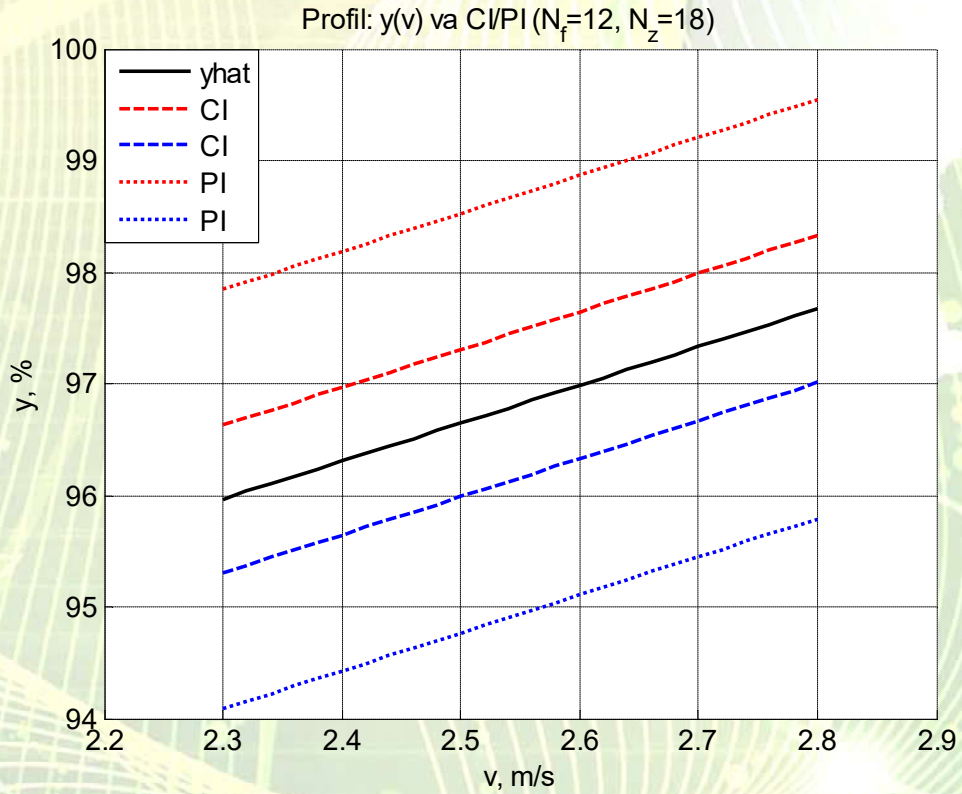



**Рис.4. Прогнозируемая кривая y (v), интервалы достоверности (CI) и предикции (PI).**

Таким образом, для оценки эффективности процесса и выбора практического режима работы использован экспериментально-



ISSN 3030-3907

статистический подход: на основе факторного плана были собраны данные, факторы (скорость воздуха v, число цепей *Nz*, число форсунок *Nf*) приведены в кодированный масштаб и построена регрессионная модель. Адекватность модели была проверена критерием Фишера, и было подтверждено, что она адекватно представляет экспериментальные данные. Анализ показал, что наибольшее влияние на повышение качества процесса приходится на фактор *Nz*; а в имеет квадратичное поведение, максимальная эффективность наблюдается в диапазоне 2,5-2,7 м/с. При увеличении *Nz* более 12 шт. выигрыш в эффективности практически незаметен, но расход воды резко возрастает.

**Заключение.** В результате многокритериальной оптимизации в качестве практически оптимального режима выбрана комбинация *v*=2.5 м/с, *Nf*=12 и *Nz*=18. В этих условиях эффективность очистки составляет ~99%, гидравлические потери ≈0.70 кПа и расход воды поддерживается на экономически приемлемом уровне. Анализ чувствительности и робастности показал, что небольшие отклонения по v вокруг оптимальной точки не оказывают существенного влияния на эффективность; Для практической эксплуатации рекомендуется поддерживать v в диапазоне 2,5±0,2 м/с, стандартизировать *Nf*=12 и работать с рядом *Nz*=18; в качестве контрольных индикаторов принимаются *y*≥99%, *ΔP*≈0.70 кПа и *Qw*≈12.8 л/час.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1975. — 576 с.
2. Юсуфбеков Н. Р., Мухаммедов Б. Э., Ғуломов Ш. М. Технологик жараёнларни бошқариш системалари: дарслик. — Тошкент: Ўқитувчи, 1997. — 704 б.
3. Остапчук Н. В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств. 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Вища школа, 1991. — 367 с.
4. Юсупбеков Н. Р., Мухитдинов Д. П. Технологик жараёнларни моделлаштириш ва оптималлаштириш асослари. — Тошкент: Фан ва технология, 2015. — 440 б.
5. Адлер Ю. П., Маркова Э. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 280 с.
6. Грачев Ю. П., Плаксин Ю. М. Математические методы планирования экспериментов: учебное пособие. — М.: ДеЛи Принт, 2005. — 296 с.
7. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. 3-



ISSN 3030-3907

е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1976. — 464 с.
8. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1985. — 327 с.



ISSN 3030-3907