

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ ВЫБОРЕ ПЫЛЕОЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одна из самых неблагоприятных операций с точки зрения пылеобразования в литейных, как конвейерного типа, так и серийного и индивидуального производства, — это выбивка опок. На этих участках наблюдается самая высокая среди работающих в литейном цехе общая заболеваемость. Для удаления газов и пыли от выбивных решеток устанавливаются механические отсосы, насыщенный пылью воздух с которых требует дальнейшей пылеочистки перед выбросом в атмосферу. Наибольшее распространение в системах очистки таких производств получили циклоны, но выбор самих пылеуловителей представляет собой нетривиальную задачу и требует системного подхода. В данной статье рассматривается метод подбора и расчета пылеочистительного оборудования на примере пыли литейных производств на основе метода анализа иерархий.

Ключевые слова: отчистка пыли, литейные производства, метод анализа иерархий, подбор пылеуловителя, параметры пылеуловителя, локальные векторы критериев, вектор глобальных приоритетов.

Параметры пыли. Литейное производство в своей основе до 75 % составляет многооперационный процесс, предполагающий работу как с сыпучими материалами, так и с аэрозолями. Активная работа создает в рабочих зонах опасные для здоровья взвеси с десятками вредных веществ.

Выделяющаяся при работе пыль приводит к профессиональным заболеваниям дыхательных путей и зрения [1].

Для подбора пылеочистительного оборудования сначала необходимо определиться с видом пыли, фракционным составом и основными параметрами, влияющими на ее дисперсность. Обычно фракционный состав определяют при помощи отбора проб пыли и просеивания ее через систему сит. В нашем случае это пыль с выбивных решеток и опок. Задаем ее частями от общей массы в процентном соотношении к диапазонам размеров частиц (табл. 1).

Тогда дисперсионные свойства пыли удобно описывать вероятностной функцией распределения $m(d)$ (1):

$$m(d) = \frac{\sum_1^i \Phi_i(d \leq d_i)}{\sum_1^n \Phi_i}, \% \quad (1)$$

и можно записать в следующем виде (табл. 1).

Строим график распределения общей массы частиц пыли по фракциям $\Phi(d_i)$ и массовой доли частиц пыли для фракций менее заданного размера $m(d)$ (рис. 1).

На оси ординат (рис. 1) выделяем точки, соответствующие массовой доли пыли 15,9 %, 50 % и 84,1 %, для которых по интегральной кривой распределения находим соответствующие им значения диаметров частиц пыли в мкм: $d_{15,9} = 19,6$; $d_{50} = 37,1$; $d_{84,1} = 65,2$.

Находим среднеквадратическое отклонение диаметров частиц для нашей пыли:

$$\sigma' = \frac{d_{50}}{d_{15,9}} = 37,1/19,6 = 1,89;$$

$$\sigma'' = \frac{d_{84,1}}{d_{50}} = 65,2/37,1 = 1,76.$$

Теоретически значения σ' и σ'' должны быть $\sigma' \approx \sigma''$. Однако на практике находят их среднее арифметическое (2):

$$\sigma_q = \frac{(\sigma' + \sigma'')}{2} = (1,89 + 1,76)/2 = 1,83. \quad (2)$$

При упрощенном построении номограммы по ГОСТ 12.2.043-80 на логарифмической вероятностной сетке получили, что заданная пыль относится к III группе: средне-дисперсная пыль (рис. 2). Если прямая или ломаная линия пыли пересекают границы нескольких групп, как в нашем случае, то принадлежность к группе определяется местом расположения медианного диаметра d_{50} .

Метод анализа иерархий (МАИ) применяется для решения задач охраны окружающей среды

Дисперсный состав пыли и массовая доля частиц

| Размеры частицы пыли d_3 на границах фракций, мкм | < 5 | 5–10 | 10–20 | 20–40 | 40–60 | 60–100 | >100 |
|---|------|------|-------|-------|-------|--------|------|
| Распределение общей массы частиц пыли по фракциям, Φ_i , % | 0,12 | 2,88 | 6 | 25 | 40 | 16 | 10 |
| Массовая доля частиц пыли для фракций менее заданного размера, $m(d)$, % | 0,12 | 3 | 9 | 34 | 74 | 90 | 100 |

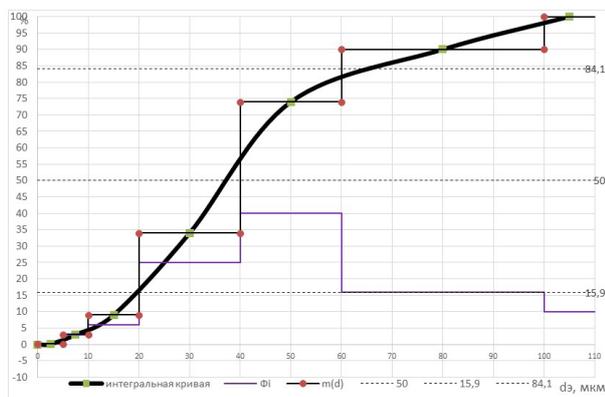
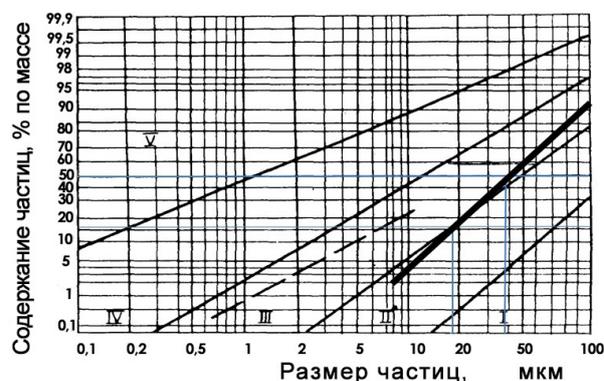
Рис. 1. Интегральный график распределения общей массы частиц пыли по фракциям $m(d)$ 

Рис. 2. Классификационная номограмма пыли — горелая земля: отсос от выбивной решетки

и промышленной экологии, но в основном для выбора стратегий [2] или решения задач экономики или планирования [3, 4]. Одним из важных ограничений при таком подходе является небольшой выбор альтернатив и как вывод — предсказуемость результатов анализа, что иногда делает такую оценку тривиальной. Например, при выборе мест для полигонов ТБО не может быть много альтернатив в принципе, а фаворит набирает почти 50 % веса, что оставляет остальным альтернативам только роль статистов [3]. Гораздо интереснее применение МАИ при решении прикладных задач по оценке оборудования [5]. В данной работе авторы впервые предлагают использование метода анализа иерархий для подбора оборудования для пылеочистки. Во-первых, модельный ряд пылеуловителей имеет десятки наименований и типоразмеров, в которых необходимо выбрать оптимальный вариант, в чем и поможет нам МАИ. Кроме того, сейчас достаточно много производителей [6–8] и метод может получиться мульти уровневым, что делает задачу перспективной.

Цель — используем МАИ для подбора наилучшего варианта циклона для заданной пыли. Ограничимся сравнением циклонов одного производителя — например, ОАО «ЭНЕРГОМАШ» [7]. Авторы не оценивают производителей в данной работе. Мы просто используем характеристики однотипных циклонов и принимаем, что пылеуловители других производителей примерно соответствуют друг другу, а сравнение производителей выходит за рамки поставленной в данной работе задачи.

Альтернативы — модели циклонов. Подбор циклона проводился по выбранным критериям. Важно понимать, что критерии выбирает эксперт самостоятельно и их количество и типы будут меняться в зависимости от опыта эксперта и поставленной задачи.

Представим наиболее существенные критерии, имеющие отношение как к пылеочистителям, так и к пыли соответственно:

Масса — этот критерий один из важных и является заменителем критерия цена. Будем считать, что масса наиболее доступного пылеуловителя на рынке будет стремиться к минимальной, и, таким образом, будем подбирать альтернативы по этому критерию.

Габаритные размеры: высота и диаметр — приоритет данных критериев во многом будет зависеть от технических условий монтажа пылеуловителя и может рассматриваться как важный при наличии каких-либо ограничений. Оценка также будет вестись на минимизацию данных критериев за отсутствием специальных требований по габаритам и монтажу.

Производительность — этот критерий определяется технологическим процессом и влияет на массу и габариты устройства. Также производительность — это существенный показатель для пыли, так как влияет на степень ее очистки. Подбор оборудования будем производить по степени приближенности данного показателя к требуемому.

Медианный диаметр частиц пыли — как уже говорилось, это диаметр частиц, при котором очистка составит не менее 50 %. Будем считать, что лучшими показателями обладают те пылеуловители, у которых медианные значения наименьшие.

Среднеквадратичное отклонение — отражает дисперсность пыли, то есть количество фракций, которые входят в ее состав. При сравнении будем стремиться к совмещению значений среднеквадратичного отклонения пыли и оборудования.

Следует отметить, что мы выбрали для этого примера критерии, которые имеют только параметрическое выражение, но метод позволяет использовать в качестве критериев и чисто экспертные

Параметры пылеуловителей

| | | Масса, кг | Высота, мм | Производительность, м ³ /ч | Диаметр, мм | d_{50} , мкм | lg σ_T |
|-----------|----|-----------|------------|---------------------------------------|-------------|----------------|---------------|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
| ЦН-11-800 | A1 | 391 | 3615,00 | 5070 | 800,00 | 3,65 | 0,352 |
| ЦН-15-600 | A2 | 162 | 2536,00 | 3810 | 600,00 | 4,5 | 0,352 |
| ЦН-24-600 | A3 | 189 | 2556,00 | 4600 | 600,00 | 8,5 | 0,308 |
| СДК-ЦН-33 | A4 | 138 | 2660,00 | 3500 | 700,00 | 2,31 | 0,364 |
| СК-ЦН-34 | A5 | 105 | 2022,00 | 3500 | 700,00 | 1,95 | 0,308 |
| СИОТ | A6 | 148 | 2900,00 | 4500 | 1200,00 | 2,6 | 0,28 |

Таблица 3

Вектор локальных приоритетов критериев

| | Масса, кг | Высота, мм | Производительность, м ³ /ч | Диаметр, мм | d_{50} , мкм | lg σ_T | Произведение | $x = (\Pi)^{(1/6)}$ | $W_c = x/s$ |
|-------|-----------|------------|---------------------------------------|-------------|----------------|---------------|--------------|---------------------|-------------|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | | | |
| C1 | 1 | 5 | 3 | 7 | 6 | 5 | 3150,0000 | 3,829 | 0,44 |
| C2 | 1/5 | 1 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1/4 | 0,0008 | 0,304 | 0,03 |
| C3 | 1/3 | 7 | 1 | 5 | 3 | 4 | 140,0000 | 2,279 | 0,26 |
| C4 | 1/7 | 3 | 1/5 | 1 | 1/4 | 1/3 | 0,0071 | 0,439 | 0,05 |
| C5 | 1/6 | 3 | 1/3 | 4 | 1 | 1/2 | 0,3333 | 0,833 | 0,10 |
| C6 | 1/5 | 4 | 1/4 | 3 | 2 | 1 | 1,2000 | 1,031 | 0,12 |
| сумма | 2,04 | 23,00 | 4,93 | 20,33 | 12,58 | 11,08 | s = | 8,714 | 1 |

$$\lambda_{\max} = \mathbf{6,526}$$

$$ИС = \mathbf{0,105}$$

$$ОС = \mathbf{0,085}$$

оценки, например, как особенности работы оборудования, положительные или отрицательные отзывы, как об оборудовании, так и о сервисных услугах, гарантии производителей, бренде и т.п.

Исходя из поставленной задачи, имеем следующие заданные и расчетные критерии выбранной пыли:

1. Объем воздуха, подвергаемый очистке, 3500 м³/ч.

2. Медианный диаметр частиц пыли $d_{50} = 37,1$ мкм.

3. Логарифм среднеквадратичного отклонения $\lg \sigma_T = 0,26$.

Данные по циклонам возьмем из технической документации и с сайтов производителей оборудования для очистки [7, 9]. Объединим эти данные в табл. 2, одновременно подбирая модели пылеуловителей по параметру объема воздуха для очистки, которые должны быть равны или меньше значения параметра производительности устройства. Обыч-

но производительность устройств задается при помощи диапазона, поэтому будем ориентироваться на его крайне максимальное значение.

Принцип сравнительных суждений. Чтобы вычислить приоритеты критериев и подобрать оценки для альтернативных решений, в МАИ используется метод парных сравнений [10]. Рассмотрим применение принципа на примере сравнения приоритетов критериев, выбранных ранее. Будем сравнивать веса критериев между собой на основе суждений, ранжируя их по степени превосходства одного критерия над другим (табл. 3). Шкала предпочтений, как правило, выбирается от 1 до 9. Например, сравнивая **Массу** и **Производительность**, примем во внимание, что масса, в нашем случае, является эквивалентом цены и имеет наивысший приоритет, но производительность — это критерий, который определяет мощность установки и уступает умеренно в соответствии со шкалой предпочтений [10]. Таким образом, Масса примет значение 3, а Про-

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Масса*

| | ЦН-11 | ЦН-15 | ЦН-24 | СДК-ЦН-33 | СК-ЦН-34 | СИОТ | П | $x = (\Pi)^{1/6}$ | W_m |
|-----------|-------|-------|-------|-----------|----------|------|-----------|-------------------|-------|
| Масса, кг | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | | | |
| A1 | 1 | 1/6 | 1/5 | 1/8 | 1/9 | 1/7 | 0,0001 | 0,201 | 0,02 |
| A2 | 6 | 1 | 4 | 1/4 | 1/6 | 1/2 | 0,5000 | 0,891 | 0,10 |
| A3 | 5 | 1/4 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/2 | 0,0417 | 0,589 | 0,07 |
| A4 | 8 | 4 | 3 | 1 | 1/2 | 2 | 96,0000 | 2,140 | 0,25 |
| A5 | 9 | 6 | 5 | 2 | 1 | 3 | 1620,0000 | 3,427 | 0,40 |
| A6 | 7 | 2 | 2 | 1/2 | 1/3 | 1 | 4,6667 | 1,293 | 0,15 |
| сумма | 36,00 | 13,42 | 15,20 | 4,21 | 2,31 | 7,14 | s = | 8,540 | 1 |

$$\lambda_{\max} = 6,358$$

$$ИС = 0,072$$

$$ОС = 0,058$$

Таблица 5

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Высота*

| | ЦН-11 | ЦН-15 | ЦН-24 | СДК-ЦН-33 | СК-ЦН-34 | СИОТ | П | $x = (\Pi)^{1/6}$ | W_h |
|------------|-------|-------|-------|-----------|----------|-------|-----------|-------------------|-------|
| Высота, мм | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | | | |
| A1 | 1 | 1/7 | 1/6 | 1/5 | 1/9 | 1/4 | 0,0001 | 0,226 | 0,03 |
| A2 | 7 | 1 | 2 | 3 | 1/3 | 4 | 56,0000 | 1,956 | 0,22 |
| A3 | 6 | 1/2 | 1 | 2 | 1/4 | 3 | 4,5000 | 1,285 | 0,15 |
| A4 | 5 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1/5 | 2 | 0,3333 | 0,833 | 0,09 |
| A5 | 9 | 3 | 4 | 5 | 1 | 7 | 3780,0000 | 3,947 | 0,45 |
| A6 | 4 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/7 | 1 | 0,0238 | 0,536 | 0,06 |
| сумма | 32,00 | 5,23 | 8,00 | 11,70 | 2,04 | 17,25 | s = | 8,782 | 1 |

$$\lambda_{\max} = 6,235$$

$$ИС = 0,047$$

$$ОС = 0,038$$

изводительность обратное ему — т.е. 1/3. Сравнивая **Производительность** с **Высотой** изделия, прием превосходство как значительное и назначим отношение их весов как 7 и 1/7 соответственно. Таким образом, заполним всю таблицу сравнения приоритетов критериев (табл. 3). Используя подобную методику, создаем матрицы приоритетов пылеуловителей относительно каждого из выбранных критериев (табл. 4–9). В этом случае альтернативы (пылеуловители) сравниваются между собой по отношению к выбранному критерию.

Расчет локальных векторов приоритетов. Для каждой матрицы мы рассчитываем локальные векторы приоритетов сравниваемых элементов иерархии. Нормируем каждую строку матрицы по формуле (3):

$$x = \sqrt[l]{C_1 \cdot C_2 \cdot \dots \cdot C_n}, \quad (3)$$

где значение степени и количество элементов соответствует размерности матрицы сравнений l (в нашем случае $l=6$), а локальный весовой коэффициент w_i , индекс согласованности (ИС) и отно-

шение согласованностей — ОС будем рассчитывать согласно методике, представленной в [10]. При этом ОС не должно быть больше 0,1, что говорит о согласованности суждений эксперта. По опыту решения задач при помощи МАИ можно утверждать, что при значениях, значительно превышающих требуемое, следует исследовать полученную матрицу на предмет радикально обратных суждений, то есть вопрос обычно заключается не в степени важности, а в принципиально ошибочном, обычно обратном суждении. При нахождении такого суждения и «перевертывании» его в матрице ОС приходит в соответствие без дополнительных усилий.

Расчеты будем проводить с помощью программного обеспечения Microsoft Excel как наиболее гибкого и доступного инструмента, не требующего специальной подготовки пользователя. На основании вышеизложенного рассчитаем вектор локальных приоритетов критериев (табл. 3). В данной и последующих таблицах будем выделять градациями серого цвета веса локальных приоритетов от светлого к темному для наглядности распределения весовых коэффициентов.

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Производительность*

| Производительность, м ³ /ч | ЦН-11 | ЦН-15 | ЦН-24 | СДК-ЦН-33 | СК-ЦН-34 | СИОТ | П | x = (П)^(1/6) | Wp |
|--|-------|-------|-------|-----------|----------|-------|----------|---------------|------|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | | | |
| A1 | 1 | 1/7 | 1/4 | 1/9 | 1/9 | 1/3 | 0,0001 | 0,230 | 0,02 |
| A2 | 7 | 1 | 6 | 1/2 | 1/2 | 5 | 52,5000 | 1,935 | 0,21 |
| A3 | 4 | 1/6 | 1 | 1/7 | 1/7 | 3 | 0,0408 | 0,587 | 0,06 |
| A4 | 9 | 2 | 7 | 1 | 1 | 6 | 756,0000 | 3,018 | 0,32 |
| A5 | 9 | 2 | 7 | 1 | 1 | 6 | 756,0000 | 3,018 | 0,32 |
| A6 | 3 | 1/5 | 2 | 1/6 | 1/6 | 1 | 0,0333 | 0,567 | 0,06 |
| сумма | 33,00 | 5,51 | 23,25 | 2,92 | 2,92 | 21,33 | s = | 9,355 | 1 |

$$\lambda_{\max} = 6,586$$

$$ИС = 0,117$$

$$ОС = 0,095$$

Таблица 7

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Диаметр*

| Диаметр, мм | ЦН-11 | ЦН-15 | ЦН-24 | СДК-ЦН-33 | СК-ЦН-34 | СИОТ | П | x = (П)^(1/6) | Wd |
|-------------|-------|-------|-------|-----------|----------|-------|----------|---------------|------|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | | | |
| A1 | 1 | 1/3 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/2 | 0,0014 | 0,334 | 0,04 |
| A2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 8 | 216,0000 | 2,449 | 0,30 |
| A3 | 6 | 1 | 1 | 2 | 2 | 9 | 216,0000 | 2,449 | 0,30 |
| A4 | 5 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 8 | 6,6667 | 1,372 | 0,17 |
| A5 | 4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 8 | 5,3333 | 1,322 | 0,16 |
| A6 | 2 | 1/8 | 1/9 | 1/8 | 1/8 | 1 | 0,0004 | 0,275 | 0,03 |
| сумма | 21,00 | 3,13 | 3,28 | 7,33 | 7,38 | 34,50 | s = | 8,202 | 1 |

$$\lambda_{\max} = 6,339$$

$$ИС = 0,068$$

$$ОС = 0,055$$

Таблица 8

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *d₅₀*

| d ₅₀ , мкм | ЦН-11 | ЦН-15 | ЦН-24 | СДК-ЦН-33 | СК-ЦН-34 | СИОТ | П | x = (П)^(1/6) | Wd ₅₀ |
|-----------------------|-------|-------|-------|-----------|----------|-------|-----------|---------------|------------------|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | | | |
| A1 | 1 | 1/2 | 1/4 | 3 | 6 | 4 | 9,0000 | 1,442 | 0,17 |
| A2 | 2 | 1 | 1/3 | 4 | 6 | 5 | 80,0000 | 2,076 | 0,24 |
| A3 | 4 | 3 | 1 | 6 | 7 | 4 | 2016,0000 | 3,554 | 0,42 |
| A4 | 1/3 | 1/4 | 1/6 | 1 | 3 | 1/2 | 0,0208 | 0,525 | 0,06 |
| A5 | 1/6 | 1/6 | 1/7 | 1/3 | 1 | 1/3 | 0,0004 | 0,276 | 0,03 |
| A6 | 1/4 | 1/5 | 1/4 | 2 | 3 | 1 | 0,0750 | 0,649 | 0,08 |
| сумма | 7,75 | 5,12 | 2,14 | 16,33 | 26,00 | 14,83 | s = | 8,522 | 1 |

$$\lambda_{\max} = 6,429$$

$$ИС = 0,086$$

$$ОС = 0,069$$

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию $lg \sigma$

| $lg \sigma$ | ЦН-11 | ЦН-15 | ЦН-24 | СДК-ЦН-33 | СК-ЦН-34 | СИОТ | П | $x = (\Pi)^{1/6}$ | $W\sigma$ |
|-------------|-------|-------|-------|-----------|----------|------|-----------|-------------------|-----------|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | | | |
| A1 | 1 | 1 | 1/5 | 2 | 1/5 | 1/7 | 0,0114 | 0,475 | 0,05 |
| A2 | 1 | 1 | 1/5 | 2 | 1/5 | 1/7 | 0,0114 | 0,475 | 0,05 |
| A3 | 5 | 5 | 1 | 4 | 1 | 1/6 | 16,6667 | 1,598 | 0,19 |
| A4 | 1/2 | 1/2 | 1/4 | 1 | 1/4 | 1/5 | 0,0031 | 0,382 | 0,04 |
| A5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 1 | 1/2 | 50,0000 | 1,919 | 0,22 |
| A6 | 7 | 7 | 6 | 5 | 2 | 1 | 2940,0000 | 3,785 | 0,44 |
| сумма | 19,50 | 19,50 | 8,65 | 18,00 | 4,65 | 2,15 | $s =$ | 8,634 | 1 |

$$\lambda_{\max} = 6,519$$

$$ИС = 0,104$$

$$ОС = 0,084$$

Таблица 10

Расчет вектора глобальных приоритетов

| Wc | 0,44 | 0,03 | 0,26 | 0,05 | 0,10 | 0,12 | 1,00 |
|-----------|-----------|------------|---------------------------------------|-------------|----------------|-------------|-------|
| | Масса, кг | Высота, мм | Производительность, м ³ /ч | Диаметр, мм | d_{50} , мкм | $lg \sigma$ | Wg |
| W | Wm | Wh | Wp | Wd | Wd_{50} | $W\sigma$ | |
| ЦН-11 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,17 | 0,05 | 0,042 |
| ЦН-15 | 0,10 | 0,22 | 0,21 | 0,30 | 0,24 | 0,05 | 0,153 |
| ЦН-24 | 0,07 | 0,15 | 0,06 | 0,30 | 0,42 | 0,19 | 0,129 |
| СДК-ЦН-33 | 0,25 | 0,09 | 0,32 | 0,17 | 0,06 | 0,04 | 0,217 |
| СК-ЦН-34 | 0,40 | 0,45 | 0,32 | 0,16 | 0,03 | 0,22 | 0,314 |
| СИОТ | 0,15 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 0,08 | 0,44 | 0,145 |

В результате расчета видно, что наибольшим весом обладают критерии массы (цены) — 0,44 и производительности — 0,26. Такой расклад наиболее характерен для пылей, где значения медианных диаметров соответствуют I–III классам пыли и не оказывают значительного влияния на выбор пылеочистительного оборудования.

Далее переходим к составлению матриц по расчету локальных приоритетов альтернатив по каждому выявленному критерию, используя методику, приведенную выше. Если в предыдущем случае мы сравнивали между собой критерии и выявляли наиболее важные из них, то теперь мы будем рассматривать, каким образом различные пылеуловители будут удовлетворять выбранным критериям и выявлять лучшие установки по каждому из них.

Ниже приведены расчеты локальных приоритетов альтернатив по критериям (табл. 4–9).

Несмотря на наличие непосредственных значений параметров установок, эксперт может внести изменения в оценочное суждение с учетом конструктивных особенностей, например, толщины стенок устройства или показателей виброиспытаний.

По локальному приоритету Масса наибольший вес получила модель СК-ЦН-34. По локальному приоритету Высота наибольший вес получила мо-

дель СК-ЦН-34. По локальному приоритету Производительность наибольший вес разделили сразу две модели: СК-ЦН-34 и СДК-ЦН-33.

По локальному приоритету Диаметр лидерство принадлежит моделям марки ЦН.

В нашем случае медианный диаметр пыли имеет значение, в несколько раз превышающее значения расчетных медианных диаметров для установок, поэтому локальный вектор будем рассчитывать исходя из выбора установки с наиболее «грубой» очисткой от ЦН-24. В дальнейшем посмотрим, как этот фактор будет влиять на конечный результат.

Наилучшим совпадением дисперсности заданного образца пыли и пылеуловителя обладает установка СИОТ.

Следует обратить внимание, что по локальным приоритетам определились разные лидеры, и конечный результат будет зависеть во многом от распределения вектора приоритетов критериев.

Векторы локальных приоритетов альтернатив (Wm , Wh , Wp , Wd , Wd_{50} , $W\sigma$) (табл. 4–9) в совокупности представляют собой матрицу $n \times n$, которая умножается на матрицу столбец Wc — вектора локальных приоритетов критериев (табл. 3). В результате мы получаем матрицу столбец Wg (табл. 10), которая и определяет глобальные приоритеты альтернатив с учетом приоритетов критериев.

В нашем случае наибольшим рейтингом обладает пылеуловитель СК-ЦН-34, наименьшее значение будет принадлежать циклону ЦН-11.

Стоит отметить, что данный метод позволяет сделать первичную оценку при выборе оборудования и требует уточнения параметров при помощи расчета. Кроме того, если пылеуловитель, который получил наивысшую оценку, по каким-либо причинам не будет доступен на рынке, его можно заменить следующим по рейтингу устройством.

Расчет пылеуловителя СК-ЦН-34. Исходные данные представлены в [9].

| | |
|---|----------------------|
| Количество очищаемого газа при рабочих условиях Q , м ³ /с | 0,972 |
| Плотность газа при рабочих условиях ρ_r , кг/м ³ | 1,128 |
| Динамическая вязкость газа при рабочей температуре 40 °С μ_r , Па·с | $1,91 \cdot 10^{-5}$ |
| Медианный размер частиц пыли d_{50} , мкм | 37,1 |
| Параметр среднеквадратичного отклонения σ | 1,83 |
| Плотность частиц $\rho_{ч}$, кг/м ³ | 2450 |

Параметры, определяющие эффективность этого циклона со степенью очистки $\eta = 50\%$ для тарировочной пыли, представлены как:

$$d_{50}^T = 1,95 \text{ мкм}; \lg \sigma^T = 0,308; v_{\text{отт}} = 1,7 \text{ м/с}.$$

Значения тарировочной пыли d_{50}^T соответствуют следующим условиям: $v_{\text{отт}}^T = 3,5$; $D_T = 0,6$ м; $\rho^T = 1930$ кг/м³; $\mu_r = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с. [9].

Вычисляем площадь сечения, м²:

$$F = \frac{Q}{V_{\text{отт}}} = \frac{0,972}{1,7} = 0,572 \text{ м}.$$

Диаметр циклона, при количестве циклонов $N=1$:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}} = \sqrt{\frac{0,572}{0,785 \cdot 1}} = 0,854 \text{ м}.$$

Диаметр циклона принимаем 0,8 м.

Действительная скорость газа в циклоне, м/с:

$$v = \frac{Q}{0,785 \cdot N \cdot D} = \frac{0,972}{0,785 \cdot 1 \cdot 0,8^2} = 1,935 \text{ м/с}.$$

Скорость газа v в циклоне не должна отклоняться от $v_{\text{отт}}$ более чем на 15 %.

$$\frac{|v_{\text{отт}} - v|}{v_{\text{отт}}} \cdot 100\% = \frac{|1,7 - 1,935|}{1,7} \cdot 100\% = 13,8\% < 15\%.$$

Потери давления в циклоне:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 1150 \cdot \frac{1,128 \cdot 1,935^2}{2} = 2428,895 \text{ Па},$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления аппарата [9].

Значение d_m характеризует параметры дисперсного состава заданной очищаемой пыли для рабочих условий выбранного циклона:

$$d_m = d_{50}^T \sqrt{\frac{D \cdot \rho_{ч}^T \cdot \mu_r \cdot v_T}{D_T \cdot \rho_{ч} \cdot \mu_r \cdot v}}$$

$$= 1,95 \sqrt{\frac{0,8 \cdot 1930 \cdot 1,91 \cdot 10^{-5} \cdot 3,5}{0,6 \cdot 2450 \cdot 2,22 \cdot 10^{-5} \cdot 1,935}} = 2,493 \text{ мкм}.$$

Тогда параметр x :

$$x = \frac{\lg \frac{d_{50}}{d_m}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_T + \lg^2 \sigma}} = \frac{\lg \frac{37,1}{2,493}}{\sqrt{0,308^2 + \lg^2 1,83}} = 2,898.$$

Определяем значение функции нормального распределения $F_0(x)$, представляющее собой полный коэффициент очистки газа η в центробежном циклоне по табличным значениям [9]:

$$\eta = 100 \cdot F_0(x) = 100 \cdot F_0(2,9) = 100 \cdot 0,9981 = 99,8\%.$$

Коэффициент очистки газа в СК-ЦН-34-800 составляет 99,8 %.

Результаты и их обсуждение. В этой статье был рассмотрен пример подбора оборудования пылеочистки для литейных производств, а точнее, пыль от выбивки литейных опок III класса. Подбор пылеуловителя предложенным методом МАИ позволил найти циклон с оптимальным соотношением цена — качество и выявил сильные и слабые стороны конкурентов. Давайте рассмотрим результаты применения метода и укажем на достоинства и недостатки.

Для начала рассмотрим конечные результаты по выбору циклона на рис. 3. Видно, что значения имеют явно выраженную экспоненциальную зависимость и это говорит о корректной логике соотношения критериев и оценке альтернатив. От-



Рис. 3. Приоритеты выбора циклонов



Рис. 4. Распределение значений коэффициентов по маркам циклонов

ставание от лидера — циклона СК-ЦН-34 явно выражено, но оставляет нам другие альтернативы для маневра. Так, циклон СДК-ЦН-33 будет также хорошим выбором при возникновении трудностей с приобретением или установкой лидера данного теста. Далее идет устойчивая группа из трех циклонов и замыкает рейтинг циклон ЦН-11, который не является худшим с точки зрения характеристик, но просто уступает конкурсантам при данном наборе критериев и логических установок для анализа методом иерархий.

Если раскрыть соотношения коэффициентов, то картина приобретает больше деталей и позволяя судить о нюансах (рис. 4).

Например, видно, что наиболее усредненными показателями обладает циклон ЦН-15 и при определенных условиях он может стать лидером в данной группе. Кроме того, мы намеренно приняли наибольший параметр d_{50} как востребованный. При изменении дисперсности такое допущение уже не будет возможным. Одним словом, параметры и критерии пылеуловителей или пыли это своеобразный конструктор для оценки и выбора оптимального оборудования. Кроме того, в оценку могут быть включены условия гарантии производителя, сроки доставки и изготовления, а также показатели надежности или шума при работе.

В заключение хочется отметить, что данный метод следует использовать при решении маркетинговых и инженерных задач выбора пылеочистительного оборудования разных типов на производстве в качестве первого приближения и обоснования выбора того или иного типа оборудования. Более точные характеристики обеспечивает приведенный в работе непосредственный расчет с учетом дополнительных параметров, таких как скорость потока, плотность пыли и поправочные коэффициенты.

Библиографический список

1. Лазаренков А. М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов // *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 138–142. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-138-142. EDN UDYUOH.
2. Иволга А. Г., Елфимова Ю. М., Радишаускас Т. А. Методические основы выбора инновационной стратегии охраны окружающей среды // *Инновационное развитие экономики*. 2019. № 1 (49). С. 35–43. EDN DCEJTD.
3. Шилова Ю. В., Гладун И. В. О применении метода анализа иерархий для выбора мест строительства полигонов ТКО на не урбанизированных территориях // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2020. № 3 (40). С. 81–89. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10041. EDN TWWKFS.

4. Юганова Т. И. Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2019. № 4. С. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93. EDN ARIGTW.

5. Jagtap H. P., Bewoor A. K. Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, Issue 2, Part A. P. 1927–1936. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.038.

6. Концерн Медведь Юг: пылеулавливающее оборудование. URL: <http://concernmedved-ug.ru/pyleulavlivayushcheye-oborudovaniye> (дата обращения: 09.11.2022).

7. ОАО «ЭНЕРГОМАШ»: Аппараты сухой очистки газов. URL: http://www.energomash-tver.ru/apparaty_sukhoj_ochistki_gazov (дата обращения: 09.11.2022).

8. СИБЭЛКОН: циклонные пылеуловители. URL: <https://sibelkon.ru/produkciya/pyleulavlivayushhee-oborudovanie/ciklonnye-filtry/> (дата обращения: 15.12.2022).

9. Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков В. И. [и др.]. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А. А. Русанова. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.

СОЛОМИН Вячеслав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2972-5037

AuthorID (РИНЦ): 440725

Адрес для переписки: v_solomin@mail.ru

ШТРИПЛИНГ Лев Оттович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

Для цитирования

Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О. Использование метода анализа иерархий при выборе пылеочистительного оборудования литейного производства // *Омский научный вестник*. 2023. № 2 (186). С. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© В. Ю. Соломин, Л. О. Штриплинг

USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD WHEN CHOOSING DUST CLEANING EQUIPMENT FOR FOUNDRY

One of the most unfavorable operations in terms of dust affect in foundries of both conveyor type and serial and individual production is the knocking out of flasks. In these areas, the highest overall incidence among workers in the foundry is observed. To remove gases and dust from knock-out gratings, mechanical exhausts are installed, the dust-saturated air from which requires further dust cleaning before being released into the atmosphere. Cyclones are the most widely used in dust cleaning systems of such industries, but the choice of dust collectors is a non-trivial task and requires a systematic approach. This article discusses the method of selection and calculation of dust-cleaning equipment on the example of foundry dust based on the hierarchy analysis method.

Keywords: dust cleaning, foundries, hierarchy analysis method, dust collector selection, dust collector parameters, local criteria vectors, global priorities vector.

References

1. Lazarenkov A. M. Issledovaniye vozdukhа rabochikh zon liteynykh tsekhov [A study of the air quality of working areas in foundries] // *Lit'ye i metallurgiya. Foundry Production and Metallurgy*. 2019. No. 2. P. 138–142. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-138-142. EDN UDYIOH. (In Russ.).

2. Ivolga A. G., Elfimova Yu. M., Radishauskas T. A. Metodicheskiye osnovy vybora innovatsionnoy strategii okhrany okruzhayushchey sredy [Methodical bases of the choice innovative strategy for environmental protection] // *Innovatsionnoye razvitiye ekonomiki. Innovative Development of Economy*. 2019. No. 1 (49). P. 35–43. EDN DCEJTD. (In Russ.).

3. Shilova Yu. V., Gladun I. V. O primeneniі metoda analiza iyerarkhiy dlya vybora mest stroitel'stva poligonov TKO na ne urbanizirovannykh territoriyakh [Application of the analytic hierarchy process for selection of construction locations of the MSW landfills in non-urbanized territories] // *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema. Bulletin of Sholom Aleichem Priamur State University*. 2020. No. 3 (40). P. 81–89. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10041. EDN TWWKFS. (In Russ.).

4. Yuganova T. I. Vybor uchastkov dlya razmeshcheniya ob'yektov obrashcheniya s otkhodami na osnove metodov mnogokriterial'nogo prinyatiya resheniy [Selection of sites for allocation of waste disposal objects based on the multicriteria decision-making methods] // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2019. No. 4. P. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93. EDN ARIGTW. (In Russ.).

5. Jagtap H. P., Bewoor A. K. Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, Issue 2, Part A. P. 1927–1936. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.038. (In Engl.).

6. Kontsern Medved' Yug: pyleulavlivayushcheye oborudovaniye [Concern Medved South: Dust extraction equipment]. URL: <http://concernmedved-ug.ru/pyleulavlivayushcheye-oborudovaniye> (accessed: 09.11.2022). (In Russ.).

7. OAO «ENERGOMASH»: Apparaty sukhoy ochistki gazov [ENERGOMASH: Dry gas scrubbers]. URL: http://www.energomash-tver.ru/apparaty_sukhoj_ochistki_gazov (accessed: 09.11.2022). (In Russ.).

8. SIBELKON: tsiklonnyye pyleuloviteli [SIBELCON: cyclone dust collectors]. URL: <https://sibelkon.ru/produkcziya/pyeulavlivayushchee-oborudovanie/ciklonnye-filtry/> (accessed: 15.12.2022). (In Russ.).

9. Birger M. I., Val'dberg A. Yu., Myagkov V. I. [et al.]. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu [Dust and ash collection handbook] / ed. by A. A. Rusanov. Moscow, 1983. 312 p. (In Russ.).

10. Saati T. Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy [Decision-making. Hierarchy analysis method] / trans. from Engl. R. G. Vachnadze. Moscow, 1993. 278 p. (In Russ.).

SOLOMIN Vyacheslav Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial Ecology and Safety Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2972-5037

AuthorID (RSCI): 440725

Correspondence address: v_solomin@mail.ru

SHTRIPLING Lev Ottovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Industrial Ecology and Safety Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

For citations

Solomin V. Yu., Shtripling L. O. Using the Hierarchy Analysis Method when choosing dust cleaning equipment for foundry // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81.

Received January 10, 2023.

© V. Yu. Solomin, L. O. Shtripling