УДК 338.502:55 DOI: 10.12737/455

Технико-экономическая оценка методов защиты от шума (на примере шума горелочных устройств нефтезаводских печей)

В.Д. Катин, *д-р техн. наук, профессор*
В.Ю. Косыгин, *д-р геол.-мин. наук, профессор*

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

e-mail: kosyginv@inbox.ru

Ключевые слова:
шумозащитные методы,
горелочные устройства,
уровень звукового давления,
экстремум,
общие затраты,
экономический эффект,
технико-экономический анализ,
метод Лагранжа.

Произведена технико-экономическая оценка шумозащитных мероприятий при работе горелочных устройств нефтезаводских печей. Представленная методика оценки применима к оценке мероприятий по защите от шума, создаваемого несколькими источниками. Задача оценки решается с применением метода неопределенных множителей Лагранжа.

1. Введение

Противошумные мероприятия, применяемые на нефтеперерабатывающих предприятиях, классифицируются на методы коллективной (СКЗ) и средства индивидуальной защиты (СИЗ). К последним относятся наушники, вкладыши, шлемы, каски и костюмы, используемые в тех случаях, когда методы СКЗ от шума не обеспечивают допустимые уровни шума исходя из частотного его спектра на конкретном рабочем месте. Считается, что СИЗ подобраны правильно, если уровень шума с учетом ослабления, обеспечиваемого ими, не превышает предельно допустимых значений.

Средства и методы СКЗ в зависимости от способа реализации подразделяются на архитектурно-планировочные, организационно-технические и акустические. Наибольший практический интерес представляют такие акустические средства, как: звукоизоляция, звукопоглощение, глушители шума. Акустические СКЗ, внедренные авторами в заводских условиях, обеспечивают подавление шума непосредственно в горелочных устройствах (ГУ) и по пути его распространения от источника до защищаемого объекта [1—4]. Однако в данных публикациях отсутствует технико-экономическая оценка предлагаемых к внедрению методов.

2. Постановка задачи определения экономичности мероприятий по снижению шума

В связи с вышесказанным в настоящей статье поставлена задача определить оптимальные и экономичные противошумные мероприятия, проводимые на основе многовариантного анализа ожидаемых приведенных затрат, обеспечивающих максимальный годовой экономический эффект Э:

$$Э = R - З \rightarrow \max , \qquad (1)$$

где R — годовой экономический результат от шумозащитных мероприятий, руб./год;

З — годовые приведенные затраты на осуществление мер по борьбе с шумом, руб./год, определяемые по формуле:

$$З = E_н \cdot К + С, \qquad (2)$$

где: К — капитальные затраты (инвестиции) на реализацию мероприятий по защите от шума, руб./год;

$E_н$ — нормативный (или принятый) показатель эффективности инвестиций;

С — годовые эксплуатационные расходы на шумозащитные мероприятия, руб./год.

Инвестиции и эксплуатационные расходы на снижение шума зависят от величины требуемого снижения шума от ГУ печей. В связи с этим необходимо технико-экономическое обоснование данного снижения шума горелок. Суммарный уровень шума $L_{сум}$ от нескольких ГУ не должен превышать допустимый уровень $L_{доп}$, рассчитываемый по формуле:

$$L_{доп} \le L_{сум} = 10\log_{10}\left(\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_i}\right), \qquad (3)$$

где L_i — уровень шума от i-й горелки после проведения на ней шумозащитного мероприятия, n — количество горелок.

Приведенные затраты $З_i$ на каждую i-ю горелку, участвующую в формировании шумового фона, представляются функцией от уровня звукового давления L_i после проведения шумозащитных мер для этого источника:

$$З_i = З_i\ L_i), \qquad (4)$$

где I = l, 2, 3, ... , n — номер источника шума(горелки).

Тогда общие приведенные затраты З на шумоглушение для всех n источников шума (ГУ) выразятся следующей формулой:

$$З(L_1, L_2, ..., L_n) = З_1(L_1) + З_2(L_2) + ... + З_n(L_n). \qquad (5)$$

Необходимо подобрать такие уровни звукового давления для каждого из n ГУ, при которых общие затраты З на шумоглушение будут минимальными и при этом суммарный шум $L_{сум}$ от всех горелок не превзойдет некоторый допустимый уровень $L_{доп}$, задаваемый заранее.

3. Решение задачи

Надо найти такие значения переменных L_i в формуле (5), при которых функция n переменных З ($L_1, L_2, \ldots, L_n$) примет минимальное значение. При этом переменные L_i не являются независимыми, а подчинены одному уравнению связи (3). Поставленная задача является задачей на условный экстремум и для ее решения используем метод неопределенных множителей Лагранжа [5].

Прежде всего составим функцию Лагранжа П:

$$З = З + \lambda \cdot \left(L_{доп} - \log_{10}\left(\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_i}\right)\right), \qquad (6)$$

где λ — множитель Лагранжа, подлежащий дальнейшему определению.

Для функции Лагранжа П найдем точки ее возможного экстремума. Для этого найдем производные этой функции по переменным L_1, L_2, … , L_n, λ и приравняем их нулю:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial П}{\partial L_1} = \dfrac{\partial З}{\partial L_1} - \lambda \cdot \dfrac{10^{0,1L_1}}{\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_i}} = 0, \\ \dfrac{\partial П}{\partial L_2} = \dfrac{\partial З}{\partial L_2} - \lambda \cdot \dfrac{10^{0,1L_2}}{\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_i}} = 0, \\ \dfrac{\partial П}{\partial L_n} = \dfrac{\partial З}{\partial L_n} - \lambda \cdot \dfrac{10^{0,1L_n}}{\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_i}} = 0, \\ \dfrac{\partial П}{\partial \lambda} = L_{доп} - 10\log_{10}\left(\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_i}\right) = 0. \end{cases} \qquad (7)$$

Возникающую при этом систему n + 1 уравнений (7) разрешим относительно n + 1 неизвестных L_1, L_2, … , L_n, λ. В результате получим:

$$\lambda_м = \sum_{i=1}^{n}\frac{\partial З_i}{\partial L_i}; \quad L_к^м = L_{доп} - 10\log_{10}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial З_i}{\partial L_i}}{\frac{\partial З_к}{\partial L_к}}\right); \qquad (8)$$

$$к = 1, 2, \ldots, n.$$

Индекс м при λ и $L_к$ в соотношениях (8) означает, что полученные значения этих величин являются координатами точки $М(\lambda^м, L_1^м, ..., L_n^м)$ возможного экстремума функции Лагранжа П.

Из конструкции функции Лагранжа очевидно следует, что при наличии связей (3) между переменными L_i экстремумы функции затрат З и функции Лагранжа П совпадают.

При этом метод Лагранжа дает лишь необходимые условия существования экстремума в точке $М(\lambda^м, L_1^м, ..., L_n^м)$. Это означает, что данная точка является всего лишь «подозрительной» на наличие экстремума, т.е. в точке М функции П и З могут иметь либо максимум, либо минимум, либо в этой точке экстремум этих функций не достигается вообще.

Для того чтобы убедиться, что в точке М функция Лагранжа П, а следовательно, и функция затрат на глушение З имеют минимум, нужно вычислить значение второго дифференциала $d^2П$ функции Лагранжа П в этой точке. Если он будет положительный, то в этой точке существует минимум данных функций.

В общем случае (при n источниках шума) формула для $d^2П$ будет выглядеть следующим образом:

$$d^2\Pi = \left(dL_1 \frac{\partial \Pi}{\partial L_1} + \ldots + dL_n \frac{\partial}{\partial L_n} \right)^2 \Pi + \\ + \frac{\partial \Pi}{\partial L_1} d^2 L_1 + \ldots + \frac{\partial \Pi}{\partial L_n} d^2 L_n . \tag{9}$$

Здесь первое слагаемое записано в символическом виде: операция возведения символа, стоящего в скобках, в степень 2 определяется как обычная операция возведения многочлена $dL_1 \frac{\partial}{\partial L_1} + \ldots + dL_n \frac{\partial}{\partial L_n}$ в квадрат с последующей подстановкой под знаки производных функции П.

Далее, поскольку переменные $L_1, \ldots, L_n$ не являются независимыми (они связаны одним уравнением связи (3)), то одну (любую) из этих переменных всегда можно выразить через остальные. Выберем в качестве такой переменной L_1 и с помощью уравнения связи (3) выразим ее через остальные переменные $L_2, \ldots, L_n$:

$$L_1 = 10\log_{10}\left(10^{0,1L_{\text{доп}}} - \sum_{i=2}^{n} 10^{0,1L_i} \right). \tag{10}$$

В соотношении (10) зависимая переменная L_1 определена как функция $L_1(L_2, \ldots, L_n)$ от $n - 1$ независимых переменных $L_2, \ldots, L_n$. Найдем теперь первый и второй дифференциалы функции L_1:

$$dL_1 = \frac{\partial L_1}{\partial L_2} dL_2 + \frac{\partial L_1}{\partial L_3} dL_3 + \ldots + \frac{\partial L_1}{\partial L_n} dL_n = \\ = -\frac{\sum_{i=2}^{n} 10^{0,1L_i} dL_i}{10^{0,1L_{4>?}} - \sum^{n} 10^{0,1L_i}}, \tag{11}$$

$$d^2 L_1 = \left(\frac{\partial}{\partial L_2} dL_2 + \ldots + \frac{\partial}{\partial L_n} dL_n \right)^2 L_1 . \tag{12}$$

Поскольку L_1 не будет независимой переменной, то в формулу (9) для $d^2\Pi$ следует подставить вместо dL_1 и d^2L_1 их выражения (11), (12). Так как переменные $L_2, \ldots, L_n$ при нашем выборе являются независимыми, то их вторые дифференциалы $d^2L_2, \ldots, d^2L_n$ равны нулю и, следовательно, соответствующие слагаемые с их участием в формуле (9) для $d^2\Pi$ исчезнут.

Из вида формулы (9) для $d^2\Pi$ и последующих комментариев к ней следует, что это выражение слишком сложно и громоздко для дальнейшего его анализа. Поэтому, не умаляя общности задачи, ограничимся в дальнейшем вычислением $d^2\Pi$ для двух горелочных устройств. При $n = 2$ выражение (9) примет вид:

$$d^2\Pi = \left(dL_1 \frac{\partial}{\partial L_1} + dL_2 \frac{\partial}{\partial L_2} \right)^2 \Pi + \frac{\partial \Pi}{\partial L_1} d^2 L_1 + \frac{\partial \Pi}{\partial L_2} d^2 L_2 . \tag{13}$$

Учитывая, что второй дифференциал d^2L_2 независимой переменой L_2 равен нулю, и возведя символическое выражение в скобках в квадрат, получим:

$$d^2\Pi = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial L_1^2} (dL_1)^2 + 2\frac{\partial^2 \Pi}{\partial L_1 \partial L_2} dL_1 dL_2 + \\ + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial L_2^2} (dL_2)^2 + \frac{\partial \Pi}{\partial L_1} d^2 L_1 . \tag{14}$$

В случае двух горелочных устройств ($n = 2$) формулы (11), (12) дадут следующие выражения для дифференциалов зависимой переменной L_1 :

$$dL_1 = -10^{0,1(L_2 - L_1)} dL_2 , \tag{15}$$

$$d^2 L_1 = -\frac{10^{0,1(L_2 + L_{4>?})} \log_5 10}{10(10^{0,1L_{4>?}} - 10^{0,1L_2})^2} (dL_2)^2 . \tag{16}$$

Вычислим производные функции Лагранжа П и подставим их в формулу (14). Кроме того, вместо дифференциалов dL_1 и d^2L_1 подставим в формулу (14) их выражения (15), (16). В результате окончательно получим для $d^2\Pi$ следующее выражение:

$$d^2\Pi = 10^{0,2(L_2 - L_1)} \cdot \frac{d^2\Pi_1}{dL_1^2} (dL_2)^2 + \frac{d^2\Pi_2}{dL_2^2} (dL_2)^2 - \\ - \frac{\lambda \cdot 10^{0,1(L_1 + L_2)} \cdot \log_e 10}{10(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2})^2} \cdot (10^{0,1(L_2 - L_1)} + 1)^2 - \\ - \left(\frac{d\Pi_1}{dL_1} - \lambda \frac{10^{0,1L_1}}{\sum_{i=1}^{2} 10^{0,1L_i}} \right) \cdot \frac{10^{0,1(L_2 + L_{\text{доп}})} \log_e 10}{10(10^{0,1L_{\text{доп}}} - 10^{0,1L_2})^2} (dL_2)^2 . \tag{17}$$

Вычислим теперь $d^2\Pi$ в точке $\text{М}(\lambda_{\text{м}}, L_1^{\text{м}}, L_2^{\text{м}})$, где в случае двух горелочных устройств:

$$\lambda_{\text{м}} = \frac{d\text{З}_1}{dL_1} + \frac{d\text{З}_2}{dL_2}, \quad L_1^{\text{м}} = L_{\text{доп}} - 10\log_{10}\left(\frac{\frac{d\text{З}_1}{dL_1} + \frac{d\text{З}_2}{dL_2}}{\frac{d\text{З}_1}{dL_1}} \right),$$

$$L_2^{\text{м}} = L_{\text{доп}} - 10\log_{10}\left(\frac{\frac{d\text{З}_1}{dL_1} + \frac{d\text{З}_2}{dL_2}}{\frac{d\text{З}_2}{dL_2}} \right). \tag{18}$$

Подставляя выражения (18) для $\lambda_{м}, L_1^{м}, L_2^{м}$ в формулу (17) и учитывая, что последний — четвертый — член этой алгебраической суммы в точке М равен нулю, получим окончательное выражение для второго дифференциала функции Лагранжа П в точке М:

$$d^2\Pi\Big|_{м} = \left(\frac{\dfrac{d З_2}{dL_2}}{\dfrac{d З_1}{dL_1}}\right)^2 \cdot \frac{d^2 З_1}{dL_1^2}(dL_2)^2 + \frac{d^2 З_2}{dL_2^2}(dL_2)^2 - \frac{\dfrac{d З_2}{dL_2}\cdot\left(\dfrac{d З_1}{dL_1}+\dfrac{d З_2}{dL_2}\right)\cdot \log_e 10}{\dfrac{d З_1}{dL_1}\cdot 10^{0,1L_{доп}+1}}(dL_2)^2. \qquad (19)$$

Определим условия, при которых функция Лагранжа П и, следовательно, функция затрат на глушение З имеют минимум в точке возможного экстремума М $(\lambda^{м}, L_1^{м}, L_2^{м})$. Для этого достаточно выяснить, при каких условиях второй дифференциал функции П в точке М будет положительным.

Так как функции $З_1(L_1)$ и $З_2(L_2)$ — убывающие (уменьшению шума L_i отвечает увеличение затрат на шумоглушение $З_i$), то их производные $\dfrac{dЗ_1}{dL_1}$ и $\dfrac{dЗ_2}{dL_2}$ отрицательные. Следовательно, третий член алгебраической суммы в правой части равенства (19) будет всегда отрицательным и, с учетом знака «минус» перед ним, он всегда будет вносить положительный вклад в значение $d^2\Pi\big|_{м}$. Из этого следует, что для того, чтобы второй дифференциал функции П в точке М возможного экстремума был положительным, достаточно, чтобы вторые производные $\dfrac{d^2З_1}{dL_1^2}$ и $\dfrac{d^2З_2}{dL_2^2}$ функций $З_1(L_1)$ и $З_2(L_2)$ были положительны, т.е. графики функций $З_1$ и $З_2$ на интервале изменения переменных L_1 и L_2 должны иметь выпуклость вниз. Таким образом, чтобы функция Лагранжа П и функция затрат на шумоглушение З имели на интервале изменения переменных L_i минимум, достаточно, чтобы графики убывающих функций $З_1(L_1)$ и $З_2(L_2)$ имели на интервалах изменения своих переменных выпуклости вниз.

Полученные результаты для двух горелочных устройств без каких-либо изменений справедливы и для тех случаев, когда имеется не два, а несколько горелочных устройств. На рис. 1 представлены три принципиально возможных случая зависимости изменения затрат на шумоглушение $З_i$ от изменения шума L_i от i-го источника. Среди всех возможных вариантов зависимости $З_i$ от L_i (линейная зависимость, зависимость с выпуклостью вверх, зависимость с выпуклостью вниз) зависимость с выпуклостью вниз обеспечивается наименьшими денежными затратами при глушении для достижения одного и того же уровня шума.

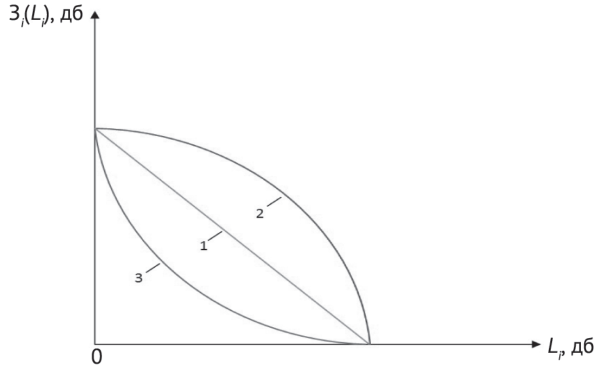

Рис. 1. Зависимость затрат $З_i$ на шумоглушение для i-го источника шума от уровня шума L_i, производимого данным источником после глушения: 1 — линейная зависимость; 2 — зависимость с выпуклостью вверх; 3 — зависимость с выпуклостью вниз.

4. Выводы

Таким образом, ставить вопрос о достижении минимума общих затрат на шумоглушение З можно только в том случае, когда сами шумозащитные методы для каждой горелки проводятся эффективными способами при стремлении к минимуму затрат для достижения одного и того же эффекта от каждой горелки.

Следовательно, при производстве шумозащитных мероприятий для каждой i-й горелки нужно строить графики $З_i$ от L_i и если эти шумозащитные методы эффективны, т.е. если затраты $З_i$ при глушении были по возможности минимальными, графики эти будут иметь выпуклость вниз. В этом случае постановка задачи о нахождении минимума общих затрат на шумоглушение З правомерна, а сама задача имеет решение, приносящее дополнительный экономический эффект.

Хотя предложенный математический метод оценки технико-экономического эффекта мероприятий по снижению шума рассмотрен на примере шума ГУ нефтезаводских печей, он может применяться и для анализа экономического эффекта снижения шума, генерируемого несколькими источниками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борьба с шумом на производстве: справочник / под ред. Е.Я. Юдина. — М.: Машиностроение, 1985.
2. *Катин В.Д., Косыгин В.Ю.* Анализ источников шума при работе горелок нефтезаводских печей и методов его уменьшения // Безопасность в техносфере. — 2009. — № 6. — С. 44–49.
3. *Катин В.Д., Мамот Б.А., Балюк А.А.* Обеспечение шумобезопасности горелочных устройств нефтезаводских печей // Охрана окружающей среды. Обзорная информация. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1997.
4. *Катин В.Д., Келарев В.И.* Разработка новых конструкций малотоксичных и малошумных горелочных устройств для нефтезаводских печей // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2003. — № 12. — С. 42–46.
5. *Ильин В.А., Позняк Э.Г.* Основы математического анализа. Часть 1. — М.: Наука, 1971.

Technical and Economic Assessment of Protection Methods against Noise (as exemplified by the Noise of Refinery Furnaces' Burner Units)

V. D. Katin, Doctor of Engineering, Professor, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
V.Yu. Kosygin, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

The technical and economic assessment of noise-protective actions is made during the operation of refinery furnaces' burner units. The presented assessment technique is applicable to evaluation of protection measures against noise created by several sources. The assessment problem is solved with application of Lagrange multiplier method.

Keywords: noise-protective methods, burner units, sound pressure level, extremum, general expenses, economic effect, technical and economic analysis, Lagrange method.

О федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы»

Постановление Правительства Российской Федерации от 21 мая 2013 г. № 426

Правительство Российской Федерации постановляет:

1. Утвердить прилагаемую федеральную целевую программу «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».
2. Министерству образования и науки Российской Федерации до 1 ноября 2013 г. внести в установленном порядке в Правительство Российской Федерации проект положения о проведении конкурсного отбора на предоставление субсидий в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» и проект правил предоставления субсидий в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».
3. Министерству экономического развития Российской Федерации и Министерству финансов Российской Федерации при формировании проекта федерального бюджета на соответствующий год включать федеральную целевую программу «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», утвержденную настоящим постановлением, в перечень федеральных целевых программ, подлежащих финансированию за счет средств федерального бюджета.

Председатель Правительства
Российской Федерации
Д.Медведев

С ФЦП можно познакомиться на сайте Минобрнауки России.