

# Комплексная оценка экологической безопасности конструкционных материалов

**В.П. Дмитренко**, заведующий кафедрой, профессор, д-р техн. наук

**С.И. Горбачев**, доцент, канд. техн. наук

**С.Н. Булычев**, доцент, канд. техн. наук

**Н.Б. Мануйлова**, доцент, канд. техн. наук

**Е.Ю. Мурманцева**, старший преподаватель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

e-mail: dmitrenkovpd@mail.ru, gor-sergey1@yandex.ru, butychovsn@yandex.ru, silen21@mail.ru, murekur@mail.ru

## Ключевые слова:

конструкционные материалы, оценка воздействия на окружающую среду, оценка экологической безопасности материала, индекс экологической безопасности материала, коэффициент экологической безопасности, окружающая среда.

*Рассмотрены вопросы комплексной оценки экологической безопасности конструкционных материалов с учетом стадий полного жизненного цикла изделий. Описаны подходы к определению индекса экологической безопасности материала – экологической характеристики материала безотносительно его применению в конкретном изделии и без учета технологии переработки. Индекс экологической безопасности материала предложено рассматривать в виде суммы трех коэффициентов экологической безопасности стадий жизненного цикла материала: добычи исходного сырья и его потенциальной экологической опасности; переработки сырья в материал; собственно материала с точки зрения экологической безопасности и воздействия его на организм человека. Применение данного критерия позволяет сравнивать экологические свойства как родственных, так и разнородных материалов.*

## 1. Введение

Настоящая статья продолжает цикл статей, посвященных оценке экологической безопасности материалов [1]. К настоящему времени синтезированы сотни тысяч различных веществ и разработаны десятки тысяч материалов на их основе. В течение многих веков человечество создавало различные материалы, ориентируясь только на комплекс эксплуатационных и технологических характеристик, не задумываясь об экологическом аспекте.

Современные материалы, как правило, представляют собой сложные комбинации разнородных веществ, по-разному влияющих на человека и окружающую среду (ОС). Наряду с инертными веществами в состав многих из них входят высокотоксичные вещества, которые при определенных условиях могут диффундировать в окружающую среду. При создании новых материалов или выборе из перечня суще-

ствующих перед конструктором стоит задача предотвратить или минимизировать эмиссию вредных веществ в ОС и воздействие на здоровье человека. Традиционно применяемые нормативные подходы к безопасности материалов не обладают достаточной эффективностью, поскольку учитывают и лимитируют только последствия и уровень негативного воздействия на ОС и человека и не могут быть непосредственно применены при решении вопроса о выборе материала изделия. К недостаткам подхода на основании предельно-допустимой концентрации (ПДК) применительно к материаловедению следует отнести ограниченность по спектру лимитируемых веществ, отсутствие показателей вредности по большинству материалов, применяемых в машиностроении и находящихся в состоянии, отличном от дисперсий или эмульсий (монолитные материалы без признаков разрушения), неучет влияния компонентов мате-

риала друг на друга в течение длительного времени (коррозия, деструкция и т.п.) и связанных с этими процессами химических превращений. Кроме того, нормативный подход не отражает поведение веществ в изменяющихся физических условиях. Поэтому для оценки экологичности конструкционных материалов правильнее применять концепцию экологического риска [2].

## 2. Подходы к определению индекса экологической безопасности материала

Ранее [1] было предложено для оценки экологической безопасности конструкционных материалов использовать индекс экологической безопасности материала (ИЭБМ)  $K_{и}$ , представляющий собой характеристику экологической безопасности материала безотносительно к его применению в конкретном изделии. ИЭБМ как интегральная характеристика материала позволяет не только оценить потенциальную опасность уже готового материала, но и характеризует нагрузку на ОС на всех этапах получения материала. ИЭБМ можно представить как совокупный вклад трех составляющих (стадий) и соответствующих им коэффициентов экологической безопасности (КЭБ) стадий жизненного цикла материала:

- добычи исходного сырья и его потенциальной экологической опасности ( $K_{сырье}$ );
- переработки сырья в материал ( $K_{изг.мат}$ );
- собственно материала с точки зрения экологической безопасности и воздействия его на организм человека ( $K_{мат}$ ), или

$$K_{и} = K_{сырье} + K_{мат}. \quad (1)$$

К конструкционным материалам — твердым материалам, предназначенным для изготовления изделий, подвергаемых механическим нагрузкам, относятся следующие группы материалов [3] (рис. 1). Любой материал будет на том или ином этапе жизненного цикла оказывать негативное влияние на ОС. Например, для углеродистых сталей наиболее экологически опасна стадия получения из сырья (металлургические процессы), для тяжелых металлов (свинец, ртуть, висмут) негативное экологическое воздействие будет наблюдаться на всех стадиях жизненного цикла. Несмотря на то, что некоторые металлы (медь, железо) встречаются в природе в самородном виде, их промышленное использование требует применения металлургических процессов. Органические композиционные материалы с термопластичной матрицей, получаемые по волоконной технологии, образуют летучие и побочные продукты на стадии изготовления сырья (волокон и нитей) и будут малоопасны на стадиях формирования композита и биологически инертны в форме конечного материала [4].

Полной экологической безопасностью обладают только некоторые материалы, получаемые из естественных видов природного сырья, таких как дерево, камень, песок, натуральный каучук, дополнительная обработка которых либо не требуется, либо сведена к минимуму и не сопровождается химическими изменениями. Поэтому для подобных экологически



Рис. 1. Классификация конструкционных материалов

инертных материалов  $K_i = 0$ , а для всех остальных  $K_i$  должен принимать положительные значения, тем большие, чем больше потенциальная совокупная экологическая опасность материала, т. е.  $K_i \in [0; +\infty)$ .

### 3. Подходы к расчету коэффициентов экологической безопасности стадий жизненного цикла материала

Можно выделить две основные проблемы определения КЭБ: высокая доля субъективности при оценке и масштабирование коэффициентов, рассчитанных для разных стадий. Экспертные оценки, применяемые для определения коэффициентов, неизбежно субъективны, так как зависят от мнения эксперта. Для снижения уровня субъективности при оценке  $K_i$  в целом необходимо снижать долю экспертных оценок, заменяя их расчетными, а при невозможности такой замены использовать усредненные экспертные оценки, основанные на мнениях нескольких экспертов.

Расчет коэффициентов безопасности  $K_x$  по отдельным  $X$ -факторам и стадиям должен основываться на сравнении с нормативно установленными значениями ПДК, предельно-допустимыми выбросами (ПДВ), предельно-допустимыми уровнями воздействия (ПДУ), —  $X_{\text{норм}}$ , и в общем виде представлять отношение:

$$K_x = \frac{X}{X_{\text{норм}}} \quad (2)$$

Коэффициенты, рассчитанные для различных стадий, неизбежно будут иметь разный числовой масштаб. Эта проблема может быть решена посредством введения масштабных коэффициентов.

Коэффициентам  $K_{\text{сырье}}$ ,  $K_{\text{изг.мат}}$ ,  $K_{\text{мат}}$  из выражения (1) будут соответствовать отдельные расчетные блоки алгоритмов. В силу широкой взаимозаменяемости материалов, многообразия их видов и методов получения, для расчета коэффициентов безопасности оправданно применять подходы, основанные на использовании системы весовых коэффициентов — степень опасности  $i$ -го фактора для окружающей среды. Для оценки экологической безопасности исходного сырья и конечного материала  $k_i$  определяется расчетным путем исходя из химической опасности веществ, входящих в их состав. При оценке технологии переработки сырья и изготовлении материала  $k_i$  задается в форме экспертных оценок.

В общем виде коэффициенты  $K_{\text{сырье}}$ ,  $K_{\text{изг.мат}}$ ,  $K_{\text{мат}}$  рассчитываются по правилу смесей:

$$K_{\text{сырье}}, K_{\text{изг.мат}}, K_{\text{мат}} = \sum_i m_i \cdot k_i \cdot A, \quad (3)$$

где:  $m_i$  — доля (массовая, объемная, доля времени, степень участия и т.п.)  $i$ -го фактора в этапе жизненного цикла материала;

$A$  — масштабный коэффициент, обеспечивающий сопоставимость результатов по отдельным коэффициентам.

В ряде случаев стоит проблема дифференциации и идентификации стадий. Так, сырьем для получения конструкционных сталей служат чугуны, для производства которых в качестве сырья используют железные руды (магнитный, красный, бурый, шпатовый железняк), марганцевые руды, флюсы (известняк, доломит, кремнезем, кварц и др.). В качестве топлива при производстве чугуна используют кокс и природный газ. Кокс получают из коксующихся углей путем их нагрева в специальных печах до 1000–1100 °С без доступа воздуха. Поэтому конструкционная сталь будет рассматриваться как конечный материал, выплавка стали из чугуна — как процесс изготовления, а чугун — в качестве исходного сырья [3]. Но чугун не природный (исходный, «атомарный»), с точки зрения технологии получения стали материал, а сам выплавляется из первичных природных материалов (которые мы можем считать в данной технологии «атомарными», т.е. не требующими дополнительных действий для их получения или создания). Эти материалы уже существуют в природе, искусственно создавать их не требуется и они не создают дополнительную экологическую нагрузку на ОС (но, будучи добыты из естественного природного места образования, они могут обладать потенциальной экологической опасностью, например, нефть).

В общем случае взаимосвязь стадий жизненного цикла «Сырье» и «Изготовление материала» можно представить в виде графовой структуры (рис. 2), где узлы графа (прямоугольники) характеризуют сырье на различных стадиях готовности, а соединяющие их линии — технологию получения сырья или конечного материала. Все вспомогательные вещества, используемые при добыче или подготовке конечного сырья, рассматриваются также в качестве сырья. Самые верхние элементы «ветвей» графа соответствуют исходным природным видам сырья (исходное сырье — ИС). Если сырье, из которого непосредственно изготавливают материал, не конечное (конечное сырье — КС), то сырьевая стадия кроме анализа экологичности сырья должна содержать анализ всех промежуточных технологических этапов получения промежуточного сырья (ПС).

Схема описывает сырьевую структуру в общем виде. На практике может возникать ситуация, когда исходное вещество одновременно и конечное, например ИС2 — КС2.

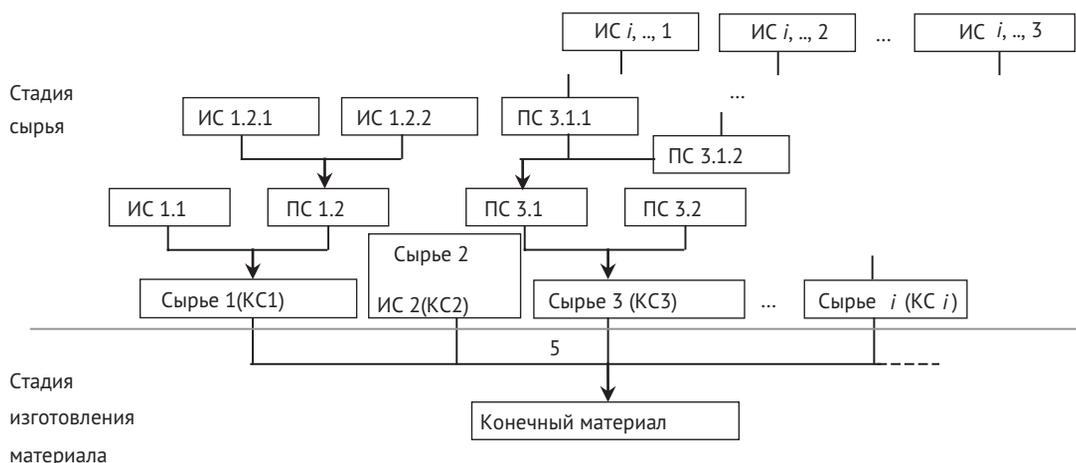


Рис. 2. Взаимосвязь стадий жизненного цикла «Сырье» и «Изготовление материала»

#### 4. Расчет коэффициента экологической безопасности материала

Наиболее простой и легко формализуемый расчет  $K_{\text{мат}}$ , так как этот коэффициент можно представить как сумму КЭБ отдельных факторов:

$$K_{\text{мат}} = K_{\text{хс}} + K_{\text{фс}} + K_{\text{ис}}, \quad (4)$$

где:  $K_{\text{хс}}$  — КЭБ, зависящий только от химического состава материала, а также применяемых в материале вспомогательных веществ (технологических покрытий, пропиток, аппретов и т. п.);

$K_{\text{фс}}$  — коэффициент, характеризующий наличие потенциально опасных физических свойств в материале или составляющих его веществах;

$K_{\text{ис}}$  — коэффициент, учитывающий физико-химические изменения в материале.

Многие современные материалы многокомпонентные (например, композиты) или состоят из ряда веществ (металлические сплавы, полимеры, резины и т. п.). Поэтому при оценке  $K_{\text{хс}}$  необходимо учитывать как степень опасности каждого из веществ, так и долю их содержания в материале:

$$K_{\text{хс}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot K_{2i} \cdot A_{\text{хс}}, \quad (5)$$

где:  $m_i$  — весовая (объемная) доля  $i$ -го вещества в материале;

$K_{2i}$  — индекс химической опасности  $i$ -го вещества;

$A_{\text{хс}}$  — масштабный коэффициент по химическому составу;

$n$  — число веществ в составе материала.

Для мономатериалов (чистые металлы или полимеры)  $K_{\text{хс}} = K_{\text{ви}}$ .

**Оценка  $K_{\text{ви}}$ .** Согласно [5] вредные вещества делятся на четыре класса опасности. Однако использование классов опасности непосредственно для расчета  $K_{\text{ви}}$  дает слишком грубое приближение, так как класс опасности учитывает концентрацию вещества только в форме диапазона и не учитывает, что вещества, относящиеся к одному классу опасности, могут обладать различной степенью опасности. Непосредственное использование для оценки  $K_{\text{ви}}$  ПДК содержащихся в ГОСТах системы стандартов безопасности труда, например [6], затруднительно, так как велик разброс по концентрации веществ. Поэтому для оценки  $K_{\text{ви}}$  предлагается подход, основанный на использовании относительных оценок. За основу сравнительного анализа взяты данные о ПДК и классах опасности, приведенные в [6], так как в данном ГОСТе приведен наиболее полный перечень опасных веществ. Использование ПДК для оценки  $K_{\text{ви}}$  позволяет повысить объективность результатов и создает эффективный механизм для сравнения экологической опасности самых разных материалов. Перейти от абсолютных значений ПДК веществ к их относительным значениям можно по формуле:

$$K_{\text{ви}} = \frac{\bar{a}_k \cdot \bar{a}}{a_i \cdot a_i} = \frac{\bar{a}_k \cdot \bar{a}}{a_i^2}, \quad (6)$$

где:  $a_i$  — ПДК  $i$ -го вещества в воздухе рабочей зоны согласно [6], мг/м<sup>3</sup>;

$\bar{a}_k$  — средняя ПДК всех веществ, относящихся к  $k$ -му классу опасности,  $k = 1-4$ , вычисляется по формуле (7);

$\bar{a}$  — средняя ПДК по всем веществам (классам опасности) для воздуха рабочей зоны, присутствующим в стандарте. Данная величина вычисляется по формуле (8) и является константой,  $\bar{a} = 74,011$ .

В зависимости (6) отношение  $\bar{a}_k / a_i$  обеспечивает учет влияния ПДК и, соответственно, степени опасности по  $i$ -му веществу, а отношение  $\bar{a}_k / a_i$  — учет влияния класса опасности вещества. Чем опаснее вещество и чем меньше для него ПДК, тем больше по модулю  $K_{vi}$ . Такой подход обеспечивает получение средневзвешенной оценки уровня экологической опасности по  $i$ -му веществу на фоне большого числа веществ (более 1300), нормируемых в стандарте [6]

$$\bar{a}_k = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} a_{jk}, \quad (7)$$

где  $n_k$  — число веществ в стандарте, относящихся к  $k$ -му классу опасности. Значения  $\bar{a}_k$  являются константами и приведены в таблице.

$$\bar{a} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \bar{a}_k. \quad (8)$$

Таблица

Зависимость между классом опасности вещества и средней концентрацией

Класс опасности	1	2	3	4
$\bar{a}_k, \text{мг/м}^3$	0,745	0,900	7,438	286,960

**Оценка  $K_{\text{фс}}$ .** К потенциально опасным физическим свойствам относятся радиоактивность, способность к образованию летучих продуктов, повышенная горючесть, взрывоопасность, высокая химическая активность и т. п. При отсутствии таких свойств  $K_{\text{фс}} = 0$ :

$$K_{\text{фс}} = \sum_i m_i \cdot K_{pi} \cdot A_p + \sum_i m_i \cdot K_{лпi} \cdot A_{лп} + \sum_i m_i \cdot K_{гi} \cdot A_g + \sum_i m_i \cdot K_{воi} \cdot A_{во} + \sum_i m_i \cdot K_{хаi} \cdot A_{ха} + \sum_i m_i \cdot K_{офi} \cdot A_{оф}, \quad (9)$$

где:  $m_i$  — массовая (объемная) доля  $i$ -го химического вещества, обладающего потенциально опасным физическим фактором;

$K_{p\ i}, K_{лп\ i}, K_{г\ i}, K_{во\ i}, K_{ха\ i}, K_{оф\ i}$  — индексы соответственно по радиоактивности, образованию летучих продуктов, горючести, взрывоопасности, химической активности и прочих опасных физических факторов для  $i$ -го химического вещества;

$A_{p\ i}, A_{лп\ i}, A_{г\ i}, A_{во\ i}, A_{ха\ i}, A_{оф\ i}$  — масштабные коэффициенты соответственно по радиоактивности, образованию летучих продуктов, горючести, взрывоопасности, химической активности и прочих опасных физических факторов для  $i$ -го химического вещества.

**Оценка  $K_{\text{ис}}$ .** Данный коэффициент характеризует происходящие в течение длительного времени и при нормальных условиях негативные процессы в материале. К таким процессам относятся изменения химического состава компонентов материала в результате старения, разложения, деструкции, а также протекающих химических процессов их естественного взаимодействия, коррозия материала (как под действием окисления воздухом, так и внутренняя), а также ряд иных потенциально опасных явлений в материале. Указанные процессы ведут к снижению потребительских свойств самого материала и создают угрозу для человека и ОС. Например, процессы старения в резинах ведут к снижению эластичности, растрескиванию и потере уплотнительных свойств. Процессы термической и световой деструкции в большинстве линейных полимеров приводят к снижению молекулярной массы и, как следствие, к падению механических свойств материала. В каждом из  $n$  компонентов (веществ) материала может протекать одновременно  $k$  процессов, поэтому  $K_{\text{ис}}$  определяется по правилу смесей:

$$K_{\text{ис}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (m_i \cdot K_{ij\ \text{изм}} \cdot A_j), \quad (10)$$

где:  $K_{ij\ \text{изм}}$  — индекс опасности негативного процесса в  $i$ -м веществе по  $j$ -му процессу;

$A_j$  — масштабный коэффициент по  $j$ -му процессу. При отсутствии перечисленных процессов  $K_{\text{ис}} = 0$ .

## 5. Расчет коэффициента экологической безопасности исходного сырья

Известно [3], что только порядка 10% добываемого сырья превращается в готовую продукцию, а оставшиеся 90% превращаются в отходы, загрязняющие ОС. По сравнению с оценкой экологической безопасности готовых материалов оценка стадии получения сырья более сложная задача, поскольку связана:

- не только с исходным сырьем как химическим веществом, но и с методами его получения;
- с разнообразием методов получения сырья;
- с большим числом применяемых вспомогательных веществ;
- с возможностью получения исходного сырья различными методами;
- с неоднозначностью способов оценки экологической безопасности методов получения сырья;
- с трудностями формализуемости оценочных методик;

- с проблемами при установлении границ области оценки (с необходимостью решить, какие стадии включать в оценку  $K_{\text{сырье}}$ ).

В качестве сырья для производства современных материалов часто используются разнородные сырьевые компоненты. Часто комбинируют органические и минеральные вещества. Например, в углепластиках может быть сочетание углеродного волокна и термопластичной или реактопластичной матрицы. Анализ столь разнообразных по своей природе, свойствам и способам получения веществ требует привлечения материаловедов-экспертов из разных областей, что увеличивает степень субъективности оценочных результатов. Множественные экспертные оценки порождают проблему совместимости результатов их оценок.

Оценка  $K_{\text{сырье}}$  проводится в соответствии с алгоритмом на рис. 3.

Алгоритм обеспечивает последовательное прохождение по всем ветвям сырьевой структуры (см. рис. 2). Каждый вид исходного природного сырья (расположенного на концах ветвей рис. 2) можно характеризовать тремя уровнями потенциально опасного воздействия на ОС: добыча; подготовка; готовое сырье (само по себе).

Промежуточное или конечное сырье имеет только стадии «получение» («подготовка») и «готовое сырье». Поэтому объем вычислений в модуле «Оценка экологической безопасности сырья» (рис. 3) будет различаться в зависимости от вида сырьевого ресурса, производиться по формулам (11–20) и алгоритмически будет носить рекурсивный характер. При расчете  $K_{\text{сырье}}$  должны быть учтены все виды материальных сырьевых ре-

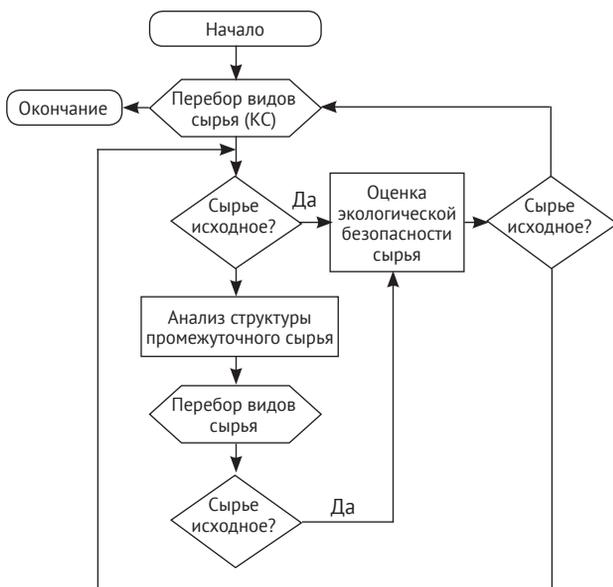


Рис. 3. Алгоритм оценки экологической безопасности сырья

сурсов, используемых при последующем изготовлении материала, включая вспомогательные материалы:

$$K_{\text{сырье}} = \sum_{i=1}^{n_A} K_{:Ai}, \quad (11)$$

где:  $K_{\text{КС } i}$  — коэффициент экологической безопасности  $i$ -го конечного сырья;

$n_{\text{КС}}$  — число видов конечного сырья, используемых для получения материала.

Коэффициент  $K_{\text{КС } i}$  носит интегральный характер и отражает совокупный экологический ущерб, нанесенный ОС со стороны  $i$ -го КС и включающий ущерб на всех стадиях, предшествующих получению данного КС, т. е. по сути  $K_{\text{КС } i}$  учитывает все процессы и вещества, входящие в состав  $i$ -й ветви графа на рис. 2. Число ветвей графа соответствует числу конечных сырьевых ресурсов, необходимых для получения материала. При этом коэффициент безопасности на каждой стадии сырьевой цепи должен в своем составе учитывать весь экологический вред, накопленный на предшествующих стадиях изготовления (рис. 4).

В общем виде  $K_{\text{КС } i}$  можно выразить выражением (номерные индексы для простоты опущены):

$$K_{\text{КС}} = (K_{\text{мкс}} + K_{\text{тпкс}}) + \sum (K_{\text{мпс}} + K_{\text{тппс}}) + \sum (K_{\text{мис}} + K_{\text{тпис}} + K_{\text{дис}}), \quad (12)$$

где  $K_{\text{мкс}}$  — КЭБ материала КС;

$K_{\text{тпкс}}$  — КЭБ технологии получения (подготовки) КС;

$K_{\text{мпс}}$  — КЭБ материала ПС;

$K_{\text{тппс}}$  — КЭБ технологии получения (подготовки) ПС;

$K_{\text{мис}}$  — КЭБ материала ИС;

$K_{\text{тпис}}$  — КЭБ технологии получения (подготовки) ИС;

$K_{\text{дис}}$  — КЭБ добычи ИС.

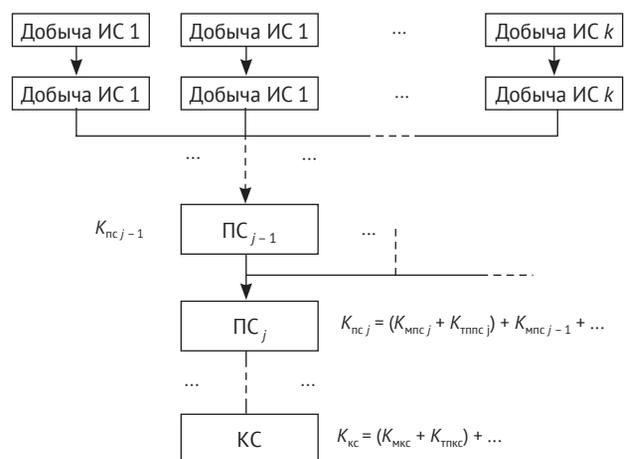


Рис. 4. Топология сырьевой ветви

**Оценка  $K_{\text{мкс}}, K_{\text{мпс}}, K_{\text{мис}}$ .** Вычисление коэффициентов  $K_{\text{мкс}}, K_{\text{мпс}}, K_{\text{мис}}$  осуществляется по формулам (4)–(10), основываясь на принципах, описанных в разделе 4. Отличие состоит в том, что многие сырьевые ресурсы однокомпонентные и для них в [6] имеются нормативные значения ПДК и нет необходимости проводить покомпонентный анализ химической опасности, что упрощает оценку.

К стадиям производства или подготовки сырья относятся обогащение, переработка, термическая обработка, химическое преобразование, сушка, флотация и т. п. Реализация этих процессов сопровождается негативным воздействием на ОС. Это воздействие можно разделить на группы, каждая характеризуется соответствующим КЭБ:

- выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух,  $K_{\text{св}}$ ;
- сброс загрязняющих веществ в объекты гидросферы,  $K_{\text{сг}}$ ;
- загрязнение недр и почвенного покрова,  $K_{\text{сп}}$ ;
- размещение отходов производства (пустая порода, шлам, зольный остаток и т. п.),  $K_{\text{со}}$ ;
- физическое загрязнение (тепловое, ионизирующее, шумовое, электромагнитное и т. п.),  $K_{\text{сф}}$ .

Коэффициенты  $K_{\text{тпкс}}, K_{\text{тппс}}, K_{\text{тпис}}$  характеризуют негативное воздействие на ОС производства и подготовки сырья на различных стадиях сырьевого цикла. Их структура носит однородный характер, и вычисление осуществляется на основе правила смесей:

$$(K_{\text{тпкс}}, K_{\text{тппс}}, K_{\text{тпис}}) = K_{\text{св}} + K_{\text{сг}} + K_{\text{сп}} + K_{\text{со}} + K_{\text{сф}}. \quad (13)$$

Оценка  $K_{\text{сф}}$  осуществляется аналогично  $K_{\text{фс}}$  (см. выражение (9)).

Когда имеется более одной стадии промежуточного сырья, необходимо суммировать коэффициенты по соответствующим видам экологического вреда. ИЭБ выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух  $K_{\text{св}}$  складывается из суммы ИЭБ каждого из  $n_{\text{в}}$  выбрасываемых веществ  $K_{\text{выбр } i}$ :

$$K_{\text{св}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{в}}} (K_{\text{выбр } i} \cdot m_{\text{возд } i} \cdot A_{\text{св}}), \quad (14)$$

где:  $m_{\text{возд } i}$  — объемная доля  $i$ -го выбрасываемого вещества среди всего выброса;

$A_{\text{св}}$  — масштабный коэффициент по фактору загрязнения воздуха.

Величина  $K_{\text{выбр } i}$  зависит от индекса химической опасности каждого  $i$ -го вещества  $K_{\text{в } i}$  (можно рассчитать для данного вещества по формуле (6)) и от отношения фактической концентрации вредного вещества, образующегося в процессе получения

(подготовки) сырья,  $a_{\text{выбр } i}$ , ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ), к предельно-допустимой среднесуточной концентрации вредного вещества в воздухе населенных мест,  $a_{\text{пдк сс } i}$ , ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ), определяемой по нормативам [7]

$$K_{\text{выбр } i} = \frac{a_{\text{выбр } i}}{a_{\text{пдк сс } i}} \cdot K_{\text{в } i}. \quad (15)$$

Индекс  $K_{\text{сг}}$  характеризует ущерб, наносимый при получении (подготовке) сырья поверхностным и подземным водам, рассчитывается аналогично опасности для воздуха

$$K_{\text{сг}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{сбр}}} K_{\text{сбр } i} \cdot m_{\text{в } i} \cdot A_{\text{сг}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{сбр}}} \frac{a_{\text{сбр } i}}{a_{\text{пдк в } i}} \cdot K_{\text{в } i} \cdot m_{\text{в } i} \cdot A_{\text{сг}}, \quad (16)$$

где:  $a_{\text{сбр } i}$  — фактическая концентрация  $i$ -го вредного вещества,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;

$a_{\text{пдк в } i}$  — предельно-допустимая концентрация  $i$ -го вредного вещества в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования,  $\text{мг}/\text{м}^3$  из [8];

$m_{\text{в } i}$  — массовая доля  $i$ -го сбрасываемого вещества от всего сброса;

$A_{\text{сг}}$  — масштабный коэффициент по фактору загрязнения воды;

$n_{\text{сбр}}$  — число сбрасываемых веществ от данного технологического этапа подготовки сырья.

Индекс  $K_{\text{сп}}$  определяется на основе тех же подходов, что и оценка вреда для воздуха и воды:

$$K_{\text{сп}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{п}}} \frac{a_{\text{п } i}}{a_{\text{пдк п } i}} \cdot K_{\text{в } i} \cdot m_{\text{п } i} \cdot A_{\text{сп}}, \quad (17)$$

где:  $n_{\text{п}}$  — число основных веществ загрязнителей почвы;

$a_{\text{п } i}$  — фактическая концентрация вредного вещества в почве на заданном удалении от источника выбросов,  $\text{мг}/\text{кг}$ ;

$a_{\text{пдк п } i}$  — ПДК вредного вещества в почве с учетом естественного фона,  $\text{мг}/\text{кг}$ , согласно [9];

$m_{\text{п } i}$  — массовая доля  $i$ -го загрязнителя почвы;

$A_{\text{сп}}$  — масштабный коэффициент по фактору загрязнения почвы.

Проблема размещения отходов при получении сырья связана с процессом обогащения различных руд. Обогащение — важнейшая промежуточная стадия между добычей полезных ископаемых и использованием извлекаемых веществ в металлургии [10]. Любое металлургическое производство требует использования предварительно обогащенных руд, так называемых концентратов. В процессе обогащения происходит не только увеличение концентрации ценных компонен-

тов до 20–70%, но и удаление вредных примесей (сера, мышьяк, кремний и т. д.). Основной проблемой при обогащении рудного сырья является формирование огромных объемов отходов обогащения, так называемых хвостов, представляющих собой преимущественно пустую породу, содержащую полезные вещества в незначительных количествах. Также пустая порода может содержать следы технологических веществ, например флотационных реагентов, многие из которых ядовиты. Кроме потенциальной экологической опасности для почвы и водных ресурсов, отвалы хвостов занимают огромную площадь, выпадающую из системы биогеоценоза. КЭБ, связанный с размещением отходов при производстве сырья  $K_{co}$ , определяется как сумма коэффициентов, характеризующих химическую опасность отхода  $K_{xco}$ , физическое негативное воздействие на ОС  $K_{фco}$  и вред ОС, наносимый потерями территории под размещение отходов  $K_{рсоco}$ :

$$K_{co} = K_{xco} + K_{фco} + K_{рсоco}. \quad (18)$$

КЭБ  $K_{рсоco}$  определяется на основании экспертных оценок без учета экономических потерь от выведения земли из оборота.

КЭБ  $K_{xco}$  определяется на основе принципов, сформулированных в выражениях (5)–(8).

При определении  $K_{фco}$  сырьевых отходов должны учитываться факторы и соответствующие КЭБ, связанные с потенциальным негативным воздействием на ОС: способность к растворению в воде и проникновению в почву и грунтовые воды  $K_{рпco}$ , способность к пылеобразованию  $K_{пco}$  и образованию газообразных летучих продуктов  $K_{лпco}$ , повышенная химическая активность веществ, входящих в отходы  $K_{xaco}$ , способность к горению и взрыву  $K_{гвco}$ , радиационная активность  $K_{рco}$ :

$$K_{фco} = K_{рпco} + K_{пco} + K_{лпco} + K_{xaco} + K_{гвco} + K_{рco}. \quad (19)$$

С учетом правила смесей (см. выражение (3)) и по аналогии с выражением (9) для случая сложного по составу отхода получим

$$K_{фco} = \sum_i m_i \cdot K_{рпco\ i} \cdot A_{рпco} + \sum_i m_i \cdot K_{пco\ i} \cdot A_{пco} + \sum_i m_i \cdot K_{лпco\ i} \cdot A_{лпco} + \sum_i m_i \cdot K_{xaco\ i} \cdot A_{xaco} + \sum_i m_i \cdot K_{гвco\ i} \cdot A_{гвco} + \sum_i m_i \cdot K_{рco\ i} \cdot A_{рco}, \quad (20)$$

где  $m_i$  — массовая доля соответствующего  $i$ -го вещества;  $K_{рпco\ i}$ ,  $K_{пco\ i}$ ,  $K_{лпco\ i}$ ,  $K_{xaco\ i}$ ,  $K_{гвco\ i}$ ,  $K_{рco\ i}$  — КЭБ для каждого  $i$ -го вещества, входящего в сырьевой отход.

$A_{рпco}$ ,  $A_{пco}$ ,  $A_{лпco}$ ,  $A_{xaco}$ ,  $A_{гвco}$ ,  $A_{рco}$  — масштабные коэффициенты по соответствующим факторам. При отсутствии данных или необходимости использования берутся равными 1.

КЭБ по радиационной безопасности  $K_{рсо\ i}$  можно определить из соотношения между уровнем радиационного излучения  $i$ -го вещества  $B_i$  и уровнем естественного радиационного фона в данной местности  $B_{\phi i}$ :

$$K_{рсо\ i} = \frac{B_i}{B_{\phi i}}. \quad (21)$$

**Оценка  $K_{дис}$ .** Добыча любых полезных ископаемых экологически опасна и должна быть отражена при формировании ИЭБМ материала. Наиболее массовым исходным сырьем для большинства конструктивных материалов являются руды (черных и цветных металлов), нерудные материалы (бокситы, нефелины, каолины, фосфатиты, известняк и др.), нефть. Добыча сырья сопровождается множественными негативными экологическими последствиями [3]: химическим загрязнением почв и атмосферного воздуха, изменением рельефа местности, механическим нарушением почв, ухудшением качества поверхностных и подземных вод, гибелью растительного и животного мира, осушением болот или, наоборот, заболачиванием местности и т. п. Многообразие состава и направленности действия не позволяет использовать универсальный математически формализованный подход к определению экологического ущерба. Поэтому оценку  $K_{дис}$  оправданно проводить с использованием метода экспертных оценок, рассматривая и анализируя риск каждого фактора, негативно воздействующего на ОС. Перед экспертным анализом необходимо сформировать список потенциальных экологических проблем по каждому виду исходного сырья.

## 6. Расчет коэффициента экологической безопасности изготовления материала

На этом этапе происходит формирование структуры материала из конечного сырья (см. рис. 2). Конечный материал по своей структуре, механическим и физико-химическим свойствам есть совокупность веществ, отличная от простой суммы составляющего его сырья. Достигается это за счет химических и физических процессов, протекающих на этапе получения материала. К химическим процессам относятся окислительно-восстановительные реакции, реакции замещения, разложения и т. п. Физические процессы, как правило, протекают при повышенной температуре, давлении, сопровождаются деформацией материала, фазовыми переходами, явлениями тепло- и массопереноса. Поскольку многие конструктивные материалы не материал «сам по себе», а обладают определенной геометрической формой (лист, пруток, швеллер, пресованный профиль и т. п.), при оценке КЭБ необходимо учитывать технологические процессы конечного формообразования. В техническом плане физи-

ко-химические процессы при получении материалов реализуются в форме технологических этапов (плавка, прокатка, пултрузионная переработка, термическая обработка, сушка, прессование и т.п.), поэтому  $K_{изг.мат}$  вычисляется как сумма КЭБ соответствующих этапов технологического процесса  $K_{изг.мат i}$ :

$$K_{изг.мат} = \sum_i K_{изг.мат i} \quad (22)$$

На каждом этапе изготовления возможны загрязнение атмосферного воздуха ( $K_{ив i}$ ), гидросферы ( $K_{иг i}$ ), почвы ( $K_{ип i}$ ), экологические проблемы, связанные с размещением отходов производства ( $K_{ио i}$ ), и негативное физическое воздействие ( $K_{иф i}$ ):

$$K_{изг.мат i} = K_{ив i} + K_{иг i} + K_{ип i} + K_{ио i} + K_{иф i} \quad (23)$$

Каждое из слагаемых формулы (23) вычисляется аналогично вычислению КЭБ при подготовке и производстве сырья (см. выражения (13)–(20)).

## 7. Выводы

Проанализировав представленные подходы, можно сделать вывод, что к основным проблемам при оценке ИЭБМ относятся:

- громоздкость и трудоемкость вычислений промежуточных КЭБ;
- необходимость проведения предварительного анализа стадий получения материала и построения графовых структур (блок-схем). Особенно это актуально для сырьевой стадии;
- разветвленность алгоритма оценки ИЭБМ и его индивидуальность для каждого материала;
- необходимость привлечения экспертов для оценки некоторых КЭБ.

Для решения этих проблем, как нам представляется, необходимо разработать типизированные расчетные схемы для основных классов конструкционных материалов. В рамках класса материалы, с точки зрения оценки ИЭБМ, мало отличаются. На основа-

нии типовых расчетных схем можно разрабатывать программное обеспечение для автоматизации расчета параметров экологической безопасности материалов. Трудности с необходимостью применять экспертные оценки можно решить постепенным накоплением экспертных решений и оценок в базе знаний и переходом к их использованию в автоматизированном режиме. Последнее основывается на принципах исчисления предикатов, фреймовых структурах и нечеткой логике.

## Основные обозначения

$K_{и}$  – безразмерный индекс экологической безопасности материала;

$K_{сырье}$  – безразмерный коэффициент, характеризующий безопасность сырья и его добычи;

$K_{мат}$  – безразмерный коэффициент, характеризующий материал с точки зрения экологической безопасности и воздействия его на организм человека;

$K_{изг.мат}$  – безразмерный коэффициент, характеризующий стадию переработки сырья в материал;

$K_x$  – коэффициент экологической безопасности стадий жизненного цикла материала;

$m_i$  – доля (массовая, объемная, доля времени, степень участия и т.п.)  $i$ -го фактора в этапе жизненного цикла материала;

$A$  – масштабный коэффициент, обеспечивающий сопоставимость результатов по отдельным коэффициентам;

$K_{хс}$  – коэффициент экологической безопасности, зависящий только от химического состава материала, а также применяемых в материале вспомогательных веществ (технологических покрытий, пропиток, аппретов и т.п.);

$K_{фс}$  – коэффициент, характеризующий наличие потенциально опасных физических свойств в материале или составляющих его веществах;

$K_{ис}$  – коэффициент, учитывающий физико-химические изменения в материале;

$K_{в i}$  – индекс химической опасности  $i$ -го вещества;

$K_{кс}$  – коэффициент экологической безопасности  $i$ -го конечного сырья.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мануйлова Н.Б. К вопросу экологической безопасности конструкционных материалов / С.Н. Булычев [и др.] // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5. № 1. С. 12–17. DOI: 10.12737/19019
2. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утверждены Президентом Российской Федерации 30 апреля 2012 г.).
3. Дмитренко В.П., Мануйлова Н.Б. Материаловедение в машиностроении. М.: ИНФРА-М, 2016. — 432 с.
4. Разработка принципов оценки экол// Научный альманах. № 1–1(15). 2016. С. 421–424.
5. ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ. «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».
6. ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ. «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
7. ГН 2.1.6.1338–03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест (Постановление Минздрава РФ от 30.05.2003 № 114).
8. ГН 2.1.5.1315–03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (Постановление Минздрава РФ от 30.03.2003 № 78).

9. ГН 2.1.7.2041–06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве (Постановление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека РФ от 23.01.2006 № 1).
10. Графкина М.В. Экологическое проектирование продукции. М.: МГТУ «МАМИ», 2006. — 223 с.

## REFERENCES

1. Manuylova N.B. K voprosu ekologicheskoy bezopasnosti konstruksionnykh materialov [On the issue of environmental safety of construction materials]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2016, V. 5, I. 1, pp. 12–17 (in Russian).
2. «Osnovy gosudarstvennoy politiki v oblasti ekologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda» (utverzhdeny Prezidentom Rossiyskoy Federatsii 30 aprelya 2012 g.) [“Basics of the state policy in the field of environmental development of the Russian Federation for the period till 2030” (approved by the President of the Russian Federation of April 30, 2012)] (in Russian).
3. Dmitrenko V.P., Manuylova N.B. *Materialovedenie v mashinostroenii* [Materials in mechanical engineering]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 432 p. (in Russian).
4. Dmitrenko V.P., Gorbachev S.I., Bulychev S.N., Manuylova N.B. Razrabotka printsipov otsenki ekologicheskoy bezopasnosti materialov [Development of the principles of environmental safety assessment materials]. *Nauchnyy al'manakh* [Science Almanac]. 2016, I. 1–1(15), pp. 421–424 (in Russian).
5. GOST 12.1.007–76 SSBT. «Vrednye veshchestva. Klassifikatsiya i obshchie trebovaniya bezopasnosti» [GOST 12.1.007–76 Occupational Safety Standards System. “Harmful substances. Classification and general safety requirements”]. (in Russian).
6. GOST 12.1.005–88 SSBT. «Obshchie sanitarno-gigienicheski trebovaniya k vozdukhу rabochey zony» [GOST 12.1.005–88 Occupational Safety Standards System. “General sanitary-hygienic requirements to the air of the working area”] (in Russian).
7. GN2.1.6.1338–03 *Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukhе naseleennykh mest* (Postanovlenie Minzdrava RF ot 30.05.2003 № 114) [GN2.1.6.1338–03 maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the ambient air of populated areas (Ministry of Health of the Russian Federation Decree of 30.05.2003 № 114)] (in Russian).
8. GN2.1.5.1315–03 *Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'ektov khozyaystvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya* (Postanovlenie Minzdrava RF ot 30.03.2003 № 78) [GN2.1.5.1315–03 maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in water bodies drinking and cultural and community water use (the Russian Ministry of Health Decree of 30.03.2003 № 78)] (in Russian).
9. GN2.1.7.2041–06 *Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve* (Postanovlenie Federal'noy sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka RF ot 23.01.2006 № 1) [GBV 2.1.7.2041–06 Maximum permissible concentration (MPC) of chemical substances in the soil (the Decision of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human well-being of the Russian Federation from 23.01.2006 № 1)] (in Russian).
10. Grafkina M.V. *Ekologicheskoe proektirovaniye produktsii* [Environmental design of products]. Moscow, MGTU «МАМИ» Publ., 2006. 223 p (in Russian).

## Comprehensive Assessment for Construction Materials' Environmental Safety

**V.P. Dmitrenko**, Doctor of Engineering, Professor, Head of Chair, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow Aviation Institute” (National Research University)

**S.I. Gorbachev**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow Aviation Institute” (National Research University)

**S.N. Bulychev**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow Aviation Institute” (National Research University)

**N.B. Manuylova**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow Aviation Institute” (National Research University)

**E. Yu. Murmantseva**, Senior Lecturer, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow Aviation Institute” (National Research University)

*Problems related to a comprehensive assessment of construction materials' environmental safety, taking into account stages of products' complete life cycle have been considered. Approaches to determination of material's safety and environmental record as environmental characteristics of the material, regardless of its use in a specific product, and without regard to processing technology have been described. It has been proposed to consider material's safety and environmental record as the sum of three environmental safety factors for material's life cycle stages: production of raw material and its potential environmental hazard; processing of raw material in the material; proper material from the standpoint of its environmental safety and effects on the human body. This criterion application allows compare the environmental properties both of cognate materials and dissimilar ones.*

**Keywords:** construction materials, environmental impact assessment, material's environmental safety assessment, material's safety and environmental record, environmental safety factor, environment.