

В современной промышленности все более актуальной становится задача учета, минимизации или даже предотвращения воздействия вредных факторов на окружающую среду. Особенно остро эта проблема стоит в индустрии пластмасс, поскольку наряду с экологически инертными веществами (например, наполнителями в виде мела или угольного порошка) в состав некоторых полимерных материалов входят и высокотоксичные вещества, которые при определенных условиях могут диффундировать в окружающую среду. Причем с годами эта проблема будет возрастать, если учесть, что в настоящее время среднестатистическое потребление различных видов полимерных материалов в России все еще в разы меньше, чем в развитых в этом отношении странах.



Экологические проблемы полимерных материалов на протяжении их жизненного цикла начинаются с нефтепереработки и продолжаются на стадии их «рождения» на химических производствах (фото: Covestro)

## Оценка экологической безопасности термопластичных полимерных материалов

В. П. Дмитренко, д. т. н., С. И. Горбачев, к. т. н., С. Н. Булычев, к. т. н., Н. Б. Мануйлова, к. т. н.,  
Е. М. Мессинева, к. б. н., Е. Ю. Мурманцева, Московский авиационный институт

### Введение

#### 1. Объекты оценки экологической безопасности.

#### 2. Методика расчета индекса экологической безопасности материала.

2.1. Оценка экологической безопасности технологии изготовления материалов.

2.2. Оценка экологической безопасности исходного сырья.

#### 3. Результаты оценки и их обсуждение.

#### Выводы

### Введение

С экологической и производственной точек зрения, полимерные материалы имеют следующие известные особенности.

1. Исходным сырьем для производства большинства полимерных материалов является нефть и ее производные, то есть вещества, обладающие даже в исходном природном состоянии высокой потенциальной экологической опасностью. Объемы использования для этой цели возобновляемого биосырья пренебрежимо малы и, по мнению многих экспертов, вряд ли будут иметь значение даже в долгосрочной перспективе.

2. По данным аналитиков европейской ассоциации Plastic Europe,

начиная с 1950 г., когда не стоял даже вопрос об экологической безопасности полимерных материалов, объемы их мирового производства постоянно росли и достигли в 2008 г. порядка 255 млн т (для сравнения: в 1950 г. – около 1,5 млн т). Финансово-экономический кризис 2008–2009 гг. привел к снижению этого показателя до 230 млн т в 2009 г., но к настоящему времени рынок полимерных материалов практически восстановился и продолжает расти.

3. Как следствие, происходит вытеснение полимерными материалами традиционных металлических материалов и расширение сферы их применения. Если раньше они применялись преимущественно для изготовления однослойных упаковочных материалов и малонагруженных корпусных изделий, то в настоящее время полимеры (в чистом виде или в форме компаундов или композиционных материалов) широко используются для изготовления высоконагруженных узлов механизмов и агрегатов, работающих при повышенных температурах. В частности, полимеры широко применяются в пищевой и химической промышленности для изготовления резер-

вуаров, реакторов и трубопроводов. Полимерные трубы применяются в коммунальном хозяйстве в системах холодного, горячего водоснабжения и отопления; обычной стала многослойная полимерная упаковка, в которой каждый слой выполняет определенную функцию, и т.д.

4. При производстве полимерных материалов применяются различные химические добавки, придающие особые свойства основному полимеру – технологические (для улучшения текучести расплава, увеличения термостабильности при переработке и т. п.) и функциональные (для снижения горючести, для повышения ударной вязкости, упругопрочностных свойств, тепло- и термостойкости, стойкости к действию факторов окружающей среды и др.).

С учетом вышесказанного все более актуальными задачами становятся объективная оценка экологической безопасности материалов на всех этапах жизненного цикла изделий из полимерных материалов и применение соответствующей методики для этих целей [1]. В настоящей работе эта задача решается на примере первой стадии жизненного цикла – производства

основного полимера. Представляется, однако, что пути и результаты решения этих задач могут быть полезными не только для производителей полимерных материалов, но и для их переработчиков, которые должны понимать, насколько экологически безопасны приобретаемые ими материалы.

Следует заметить, что предлагаемые в статье методика и критерий оценки экологической безопасности материалов не отрицают, а дополняют известные подходы к решению этой задачи и соответствующие нормативные и регламентирующие документы (положения REACH, нормы FDA и т. п.) в виде обобщенного показателя экологической безопасности. Близкая по постановке задача решалась в работе [2], но была ограничена конкретным объектом анализа.

При необходимости, используя предлагаемую в статье методику, можно оценить экологическую безопасность любого другого материала, и не только полимерного.

### 1. Объекты оценки экологической безопасности

Из широкого ассортимента разработанных и промышленно применяемых полимеров в настоящей статье для последующего анализа были выбраны некоторые конкретные представители крупнотоннажных линейных термопластов, выпускаемых в форме гранулята:

- полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) марки ПЭ100;
- полипропилен (ПП) марки ПП 21007-30Т;
- поликарбонат (ПК) марки РС-010;

- поливинилхлорид (ПВХ) марки ПВХ-С-6768-М;
- полиэтилентерефталат (ПЭТ) марки РОСПЭТ-А.

### 2. Методика расчета индекса экологической безопасности материала

Для оценки экологических свойств конструкционных материалов предложено использовать индекс экологической безопасности материала (ИЭБМ)  $K_{и}$ , представляющий собой характеристику материала независимо от его применения в конкретном изделии [3, 4]. ИЭБМ является интегральной характеристикой материала и позволяет оценить не только потенциальную опасность уже готового материала, но и характеризует нагрузку на окружающую среду (ОС) на всех этапах получения материала, начиная с добычи исходного сырья. С ростом  $K_{и}$  увеличивается степень негативного воздействия на ОС. В общем виде ИЭБМ отражает совокупный вклад трех составляющих (стадий жизненного цикла) и равен сумме соответствующих коэффициентов  $K$  экологической безопасности (КЭБ) материала:

- $K_{сыр}$  (соответствует добыче исходного сырья и его потенциальной экологической опасности);
- $K_{изг.мат}$  (соответствует стадии переработки сырья в материал, то есть изготовления материала);
- $K_{мат}$  (отражает свойства готового материала с точки зрения экологической безопасности и воздействия его на организм человека).

Отсюда вытекает, что

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

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

$$\{K_{сыр}, K_{изг.мат}, K_{мат}\} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot k_i \cdot A_i, \quad (2)$$

где  $m_i$  – доля (массовая, объемная, доля времени, степень участия и т. п. в зависимости от вида фактора)  $i$ -го фактора на стадии жизненного цикла материала;  $A$  – масштабный коэффициент, обеспечивающий сопоставимость результатов по отдельным коэффициентам. По умолчанию  $A = 1$ . Для любых предложенных коэффициентов – при отсутствии соответствующих им опасных факторов или отсутствии данных для расчета – его значение принимается равным нулю.

Наиболее простым и легко формализуемым является расчет  $K_{мат}$  в виде суммы КЭБ отдельных факторов [1]:

$$K_{мат} = K_{xc} + K_{fc} + K_{ис} \quad (3)$$

где  $K_{xc}$  – коэффициент экологической безопасности, зависящий от химического состава материала и вспомогательных компонентов (технологических покрытий, пропиток, аппретов и т. п.);  $K_{fc}$  – коэффициент, характеризующий наличие потенциально опасных физических свойств материала или составляющих его компонентов;  $K_{ис}$  – коэффициент, учитывающий физико-химические изменения в материале.

Поскольку многие из современных материалов содержат в своем составе несколько компонентов, при оценке  $K_{xc}$  необходимо учитывать степень опасности каждого из веществ в соответствии с правилом смесей [5]:

$$K_{xc} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot k_{bi} \cdot A_{xi} \quad (4)$$

где  $m_i$  – весовая (или объемная) доля  $i$ -го компонента в материале;  $k_{bi}$  – индекс химической опасности  $i$ -го компонента;  $A_{xi}$  – масштабный ко-

Таблица 1. Результаты оценки потенциально опасных физических свойств материалов [7, 8]

Полимер	Токсичность при нормальных условиях	Химическая стойкость	Диапазон рабочих температур, °С	Огнестойкость	Токсичность продуктов разложения	Дымообразование	Горючесть	$K_{fc}$
ПЭВП	Нетоксичен, не выделяет летучих продуктов, может контактировать с пищей	Высокая	От –60 до 60	Низкая	Средняя	Низкое	Горит вне пламени	0,8
ПП	Нетоксичен, не выделяет летучих продуктов, может контактировать с пищей	Высокая	От –50 до 90	Низкая	Средняя	Среднее	Горит вне пламени с образованием капель	1,3
ПК	Нетоксичен, не выделяет летучих продуктов	Высокая	От –50 до 150	Высокая	Низкая	Среднее	Не поддерживает горение	0,6
ПВХ	Нетоксичен, не выделяет летучих продуктов	Высокая	От –40 до 80	Высокая	Очень высокая	Высокое	То же	6,6
ПЭТ	Нетоксичен, не выделяет летучих продуктов, может контактировать с пищей	Высокая	От –60 до 170	Высокая	Низкая	Низкое	То же	0,3

Таблица 2. Ориентировочные значения КЭБ  $K_{\Phi}$  по физическим свойствам для локальных факторов экологического вреда материала\*

Уровень фактора	Токсичность при нормальных условиях	Химическая стойкость	Диапазон рабочих температур, °С	Огнестойкость	Токсичность продуктов разложения	Дымообразование	Горючесть
Низкий	0–1	0,2	0,2	0,3	0–0,5	0	0
Средний	1–5	0,1	0,1	0,2	0,5–2	0,2	0,1
Высокий	5–20	0	0	0	2–5	0,5	0,3

\* Усредненные экспертные значения.

эффицент по химическому составу (по умолчанию равен 1);  $n$  – число компонентов в составе материала.

В работах [3, 5] был предложен подход для оценки  $K_{\Phi}$ , основанный на сравнительной оценке ПДК в воздухе рабочей зоны  $i$ -го компонента со средними значениями показателя ПДК по  $k$ -му классу опасности  $\bar{a}_k$  и средней ПДК по всем компонентам  $\bar{a}$  [6]:

$$K_{\Phi i} = \bar{a} / (\bar{a}_k \cdot a_i), \quad (5)$$

где коэффициенты  $\bar{a} = 77,011$ ,  $\bar{a}_1 = 0,745$ ,  $\bar{a}_2 = 0,9$ ,  $\bar{a}_3 = 7,438$ ,  $\bar{a}_4 = 286,96$  являются константами. Номера индексов  $\bar{a}_1$ ,  $\bar{a}_2$ ,  $\bar{a}_3$ ,  $\bar{a}_4$  соответствуют классам опасности материала.

Для однокомпонентных материалов, к которым можно отнести и анализируемые полимеры,  $K_{\Phi} = K_{\Phi i}$ .

Для оценки  $K_{\Phi}$  необходимо рассмотреть физические свойства материала при различных условиях внешнего воздействия (табл. 1). Эти условия можно разделить на нормальные (температура  $T = 20$  °С, низкий уровень солнечной радиации, химически неагрессивная ОС) и экстремальные (повышенная температура, воздействие кислот, щелочей и химически активных веществ и т. п.). Из экстремальных условий наиболее негативными последствиями для человека и ОС обладает повышенная температура, при которой усиливаются процессы термической деструкции, сопровождающиеся выделением потенциально опасных продуктов разложения [7].

В табл. 2 приведены ориентировочные усредненные экспертные (получены методом экспертной оценки) значения локальных факторов экологического вреда по наиболее опасным физическим свойствам анализируемых материалов. Каждый фактор варьируется на трех уровнях: низкий, средний и высокий. Низкому уровню соответствует значение фактора, близкое к фоновым значениям, или его полное

отсутствие. Факторы, связанные с токсичностью, варьируются в диапазоне 0–5 в зависимости от степени опасности выделяемых веществ.

Расчет  $K_{\Phi}$  производился суммированием коэффициентов  $K_{\Phi i}$  по всем учитываемым  $n$  локальным факторам экологического вреда:

$$K_{\Phi} = \sum_{i=1}^n K_{\Phi i}. \quad (6)$$

Для оценки негативных процессов, происходящих в материале в течение длительного времени при нормальных условиях, используется коэффициент  $K_{\Phi}$ . К таким процессам относятся изменения химического состава компонентов материала в результате старения, разложения, деструкции, а также протекающих химических процессов их естественного взаимодействия, коррозии материала (как под действием окисления воздухом, так и внутренней коррозии), а также ряд иных потенциально опасных явлений в материале. Указанные процессы ведут как к снижению потребительских свойств самого материала, так и создают угрозу человеку и ОС [8].

В общем случае с учетом того, что материал может состоять из  $n$  компонентов, в каждом из которых может протекать одновременно  $k$  процессов,  $K_{\Phi}$  определяется по правилу смесей [5]:

$$K_{\Phi} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (m_i \cdot K_{\Phi i j}), \quad (7)$$

где  $K_{\Phi i j}$  – индекс опасности негативного процесса в  $i$ -ом компоненте по  $j$ -му процессу,  $m_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента.

### Литература

1. *Дмитренко В. П., Горбачев С. И., Булычев С. Н.* и др. Методы оценки экологической безопасности конструкционных материалов // *Безопасность в техносфере*. – 2016. – № 6 (63). – С. 38–47.
2. *Колерт К.* Экологическая оценка упаковок, изготовленных из различных материалов // *Полимерные материалы*. – 2008. – № 6. – С. 4–10.
3. *Дмитренко В. П., Мануйлова Н. Б., Булычев С. Н., Горбачев С. И.*

К вопросу экологической безопасности конструкционных материалов // *Безопасность в техносфере*. – 2016. – № 1 (58). – С. 12–18.

4. *Дмитренко В. П., Горбачев С. И., Булычев С. Н.* и др. Критерии оценки экологической безопасности конструкционных материалов / Сб. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды», г. Белгород, 6–8 декабря 2016 г. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – С. 86–90.

5. *Дмитренко В. П., Булычев С. Н., Горбачев С. И.* и др. Определение коэффициента экологической безопасности конструкционных материалов // *Научный альманах*. – 2017. – № 1–3 (27). – С. 49–52. DOI: 1017117/na.2017.01.03.049.

6. ГН 2.1.6.1338-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест (Постановление Минздрава России от 30.05.2003 № 114).

7. *Дмитренко В. П., Мессинева Е. М., Фетисов А. Г.* Управление экологической безопасностью в техносфере. – СПб.: Издательство «Лань», 2015. – 420 с.

8. *Дмитренко В. П., Сотникова Е. В., Кривошеин Д. А.* Экологическая безопасность в техносфере. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 514 с.

(Продолжение следует)

### Evaluation of Ecological Safety of Thermoplastic Polymer Materials

V. P. Dmitrenko, S. I. Gorbachev, S. N. Bulychev, N. B. Manuylova, E. M. Messineva, E. Y. Murmantseva

The problems of ecological safety of the most widely used linear polymer materials are considered. A comparative analysis of the negative impact on the environment based on the calculation of the environmental safety index of the material was carried out. The assessment is of an integral nature and takes into account the raw materials, the chemical technology of polymer production and the production of granulate.

(To be continued)

В современной промышленности все более актуальной становится задача учета, минимизации или даже предотвращения воздействия вредных факторов на окружающую среду. Особенно остро эта проблема стоит в индустрии пластмасс, поскольку наряду с экологически инертными веществами (например, наполнителями в виде мела или угольного порошка) в состав некоторых полимерных материалов входят и высокотоксичные вещества, которые при определенных условиях могут диффундировать в окружающую среду. Причем с годами эта проблема будет возрастать, если учесть, что в настоящее время среднестатистическое потребление различных видов полимерных материалов в России все еще в разы меньше, чем в развитых в этом отношении странах.



Экологические проблемы полимерных материалов на протяжении их жизненного цикла начинаются с нефтепереработки и продолжаются на стадии их «рождения» на химических производствах (фото: Covestro)

# Оценка экологической безопасности термопластичных полимерных материалов

В. П. Дмитренко, д. т. н., С. И. Горбачев, к. т. н., С. Н. Булычев, к. т. н., Н. Б. Мануйлова, к. т. н.,  
Е. М. Мессинева, к. б. н., Е. Ю. Мурманцева, Московский авиационный институт

(Окончание. Начало в ПМ № 6 2017)

## Введение

1. Объекты оценки экологической безопасности.
2. Методика расчета индекса экологической безопасности материала.

### 2.1. Оценка экологической безопасности технологии изготовления материалов.

### 2.2. Оценка экологической безопасности исходного сырья.

3. Результаты оценки и их обсуждение.

## Выводы

### 2.1. Оценка экологической безопасности технологии изготовления материалов

Для оценки экологической безопасности, как указано ранее (см. разд. 1), были выбраны конкретные представители крупнотоннажных линейных термопластов, выпускаемые в форме гранулята:

- полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) марки ПЭ100;
- полипропилен (ПП) марки ПП 21007-30Т;
- поликарбонат (ПК) марки РС-010;
- поливинилхлорид (ПВХ) марки ПВХ-С-6768-М;
- полиэтилентерефталат (ПЭТ) марки РОСПЭТ-А.

Несмотря на то что все эти рассматриваемые в статье материалы относятся к классу линейных термопластов и имеют одинаковое основное исходное сырье – нефть (или частично вторичный полимер того же вида), технологии их производства существенно различаются в физико-химическом плане, что обуславливает различную степень негативного воздействия на окружающую среду (ОС).

Химическая структура, механические и физико-химические свойства конечного линейного термопласта формируются в результате ряда физических и химических процессов, протекающих на этапе изготовления гранулята. Физические процессы обычно протекают при повышенной температуре, давлении, сопровождаются фазовыми переходами, деформацией материала, массо- и теплопереносом. К химическим процессам относятся реакции замещения, окислительно-восстановительные реакции, разложения и т.п.

Коэффициент экологической безопасности (КЭБ)  $K_{изг.мат}$  изготовления материала вычисляется как сумма КЭБ  $K_{изг.мат i}$  соответствующих этапов технологического процесса [1]:

$$K_{изг.мат} = \sum_i K_{изг.мат i} \quad (8)$$

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

$$K_{изг.мат i} = K_{ив i} + K_{иг i} + K_{ип i} + K_{ио i} + K_{иф i} \quad (9)$$

Точность и объективность оценки этих КЭБ зависит от степени детализации при анализе технологии производства материала. Дополнительная сложность состоит в том, что для получения гранулята полимера даже одной конкретной марки часто используют различные технологии производства. Например, ПВХ получают тремя способами: суспензионным (около 80 % ПВХ), эмульсионным (10 %) и полимеризацией в массе (иначе – блочным способом). Поэтому в статье рассмотрен наиболее массовый и широко применяемый способ производства из возможных.

## 2.2. Оценка экологической безопасности исходного сырья

Для оценки экологической безопасности исходного сырья предлагается учитывать все виды материальных ресурсов, используемых при изготовлении материалов, через КЭБ  $K_{\text{сыр}}$  исходного сырья. При расчете  $K_{\text{сыр}}$  должны быть учтены все виды материально-сырьевых ресурсов, используемых при последующем изготовлении материала (включая вспомогательные материалы, такие как катализаторы, ингибиторы, растворители, отвердители и т. п.) [1, 8]:

$$K_{\text{сыр}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{кс}}} K_{\text{кс}i} \quad (10)$$

где  $K_{\text{кс}i}$  – КЭБ  $i$ -го конечного сырья;  $n_{\text{кс}}$  – количество видов конечного сырья, используемых для получения материала.

Коэффициент  $K_{\text{кс}i}$  имеет интегральный характер и отражает собой совокупный экологический ущерб, нанесенный различным сферам окружающей среды (ОС) со стороны  $i$ -го конечного сырья, включая ущерб от всех предшествующих технологических стадий цикла его изготовления.

К стадиям производства или подготовки сырья относятся [9]: обогащение, переработка, термическая обработка, химическое преобразование, сушка, флотация и др. Реализация этих процессов сопровождается негативными воздействиями на ОС, которые можно разделить на группы, каждая из которых характеризуется соответствующим КЭБ [1]:

- выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух ( $K_{\text{св}}$ );
- сброс загрязняющих веществ в объекты гидросферы ( $K_{\text{сг}}$ );
- загрязнение недр и почвенного покрова ( $K_{\text{сн}}$ );
- размещение отходов производства – пустой породы, шлама, зольного остатка и т.п. ( $K_{\text{со}}$ );
- физическое загрязнение – тепловое, ионизирующее, шумовое, электромагнитное и т. п. ( $K_{\text{сф}}$ ).

Суммарный КЭБ сырья  $i$ -го вида вычисляется по формуле

$$K_{\text{кс}i} = K_{\text{св}} + K_{\text{сг}} + K_{\text{сн}} + K_{\text{со}} + K_{\text{сф}} \quad (11)$$

Более подробно теоретическое обоснование оценки экологического вреда от производства исходного сырья приведено в работах [1, 4, 10].

В технологической цепочке от исходного сырья до конечного продукта учитывается суммарный экологический вред, нанесенный компонентами и технологией производства и преобразования основных и наиболее опасных видов сырья. В качестве исходного сырья указываются только исходные компоненты, которые содержатся в природе в естественном виде. Например, динатриевая соль бисфенола А образуется при взаимодействии бисфенола А с едким натром, сам бисфенол А получают в результате реакции фенола и ацетона, которые в свою очередь являются продуктом разложения гидроперекиси кумола при катализе серной кислотой. Гидроперекись кумола образуется из кумола (изопропилбензола) при его некаталитическом окислении воздухом. Кумол, в свою очередь, является продуктом алкилирования бензола пропиленом, а последние образуются в качестве побочных продуктов крекинга нефти.

Многие из исходных веществ также имеют весьма длинные химические цепочки преобразования из естественно-природного вида в виды конечного сырья. Поэтому проблема оценки экологического вреда получения сырья для последующего производства полимерного гранулята является достаточно сложной и трудно формализуемой. Сложность инженерной оценки  $K_{\text{кс}}$  (подобно выражениям 4–7) связана не только с разнообразием исходных материалов, нуждающихся в анализе, но и с многообразием химических способов получения одного и того же вещества, обладающих разной негативной нагрузкой на ОС. Поэтому наряду с чисто формальными методами оценки экологической безопасности предлагается применение и метода экспертных оценок.

## 3. Результаты оценки и их обсуждение

Исходные данные и результаты расчета по формуле (5) КЭБ  $K_{\text{кс}}$ , зависящего от химического состава материала и вспомогательных компонентов, представлены в табл. 3 и на рис. 1.

Анализируемые полимеры содержат пренебрежимо малый объем добавок и могут рассматриваться как однокомпонентные. Термопласты характеризуются завершённой химической структурой и значительной ее стабильностью при нормальных условиях эксплуатации. Поэтому для ПП, ПК, ПВХ и ПЭТ  $K_{\text{ис}} = 0$ . Исключение составляет ПЭВП (особенно в форме тонких прозрачных пленок), характеризующийся относительно низкой стойкостью к солнечной радиации, для которого  $K_{\text{ис}} = 0,15$ .

Таблица 3. Результаты определения показателей химической опасности материалов

Полимер	Марка полимера	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	$K_{\text{кс}}$
ПЭВП	ПЭ100	10	4	0,027
ПП	ПП 21007-30Т	10	3	1,035
ПК	РС-010	10	4	0,027
ПВХ	ПВХ-С-6768-М	6	3	1,726
ПЭТ	РОСПЭТ-А	Не установлен	Не установлен	0,5*

\* Данные получены методом экспертной оценки.

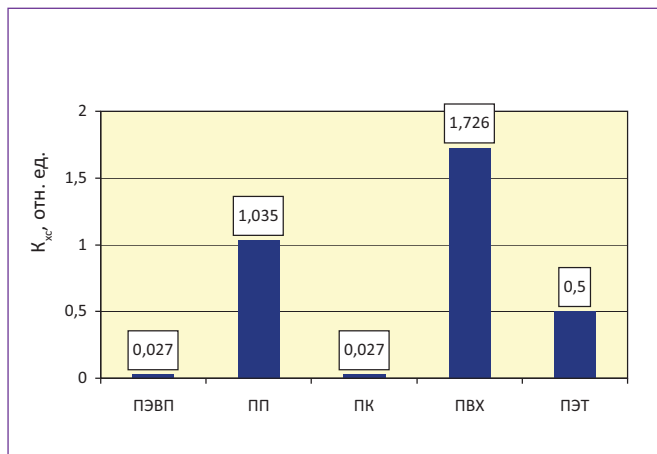


Рис. 1. Значения КЭБ  $K_{\text{кс}}$  для различных анализируемых материалов

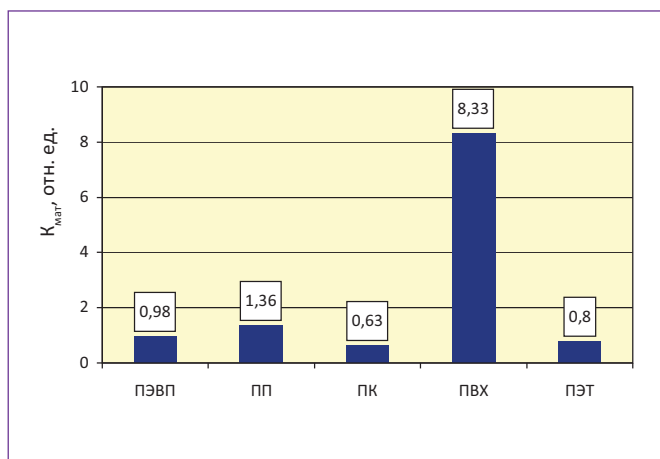


Рис. 2. Значения КЭБ  $K_{\text{мат}}$  для различных анализируемых материалов

Подставив полученные значения  $K_{\text{кс}}$ ,  $K_{\text{фс}}$  и  $K_{\text{ис}}$  в формулу (3), получим следующие значения  $K_{\text{мат}}$  для различных анализируемых материалов:  $K_{\text{мат ПЭ}} = 0,98$ ;  $K_{\text{мат ПП}} = 1,36$ ;  $K_{\text{мат ПК}} = 0,63$ ;  $K_{\text{мат ПВХ}} = 8,33$ ;  $K_{\text{мат ПЭТ}} = 0,8$  (рис. 2).

Сравнение полученных данных показывает значительный разброс экологических показателей конечных материалов, из которых особенно выделяется ПВХ как наименее экологичный. Для более адекватной оценки необходимо также оценить экологический ущерб от используемого исходного сырья и применяемой технологии изготовления материалов, характеризуемый КЭБ  $K_{\text{сыр}}$  и  $K_{\text{изг.мат}}$  соответственно.

Далее, в начале каждого последующего раздела, кратко описан наиболее распространенный способ

производства выбранного полимера, что необходимо для последующего анализа вклада технологической составляющей в экологическую безопасность [11]. Более подробное описание можно найти, например, в соответствующих статьях «Химической энциклопедии» [9].

### 3.1. Полиэтилен высокой плотности

В РФ наибольшее распространение получил газофазный способ производства ПЭВП по так называемым технологиям Unipol, Innovene, Exxpol, Spherilene и др. Технологии основаны на газофазной реакции полимеризации этилена, происходящей в присутствии катализаторов Циглера-Натта при температуре 70–1100 °С и давлении 1,5–3 МПа. Самая распространенная схема производства полимера включает три непрерывные стадии: полимеризация сырья, очистка продукта от остатков катализатора и его высушивание. Аппараты для катализаторной подачи выделяют в мерники пятипроцентный раствор смешанного катализатора, после чего он поступает в бак, в котором смешивается с органическим растворителем (бензином и циклогексаном) до необходимой концентрации в 0,2 %. Из бака готовая смесь катализатора отводится в реактор, где поддерживается при необходимом давлении. Этилен подводится в реактор снизу, где впоследствии, перемешиваясь с катализатором, образует рабочую смесь. Для производства полиэтилена при пониженном давлении характерно загрязнение продукта остатками катализаторной смеси. Очистка основного продукта производится нагреванием смеси, в результате чего происходят разрушение катализатора, дальнейшее отделение примесей (цен-

Таблица 4. Результаты оценки экологической опасности технологического процесса производства гранулята ПЭВП

Технологический этап	Применяемое вещество	Класс опасности	Уровень фактора в зависимости от объекта воздействия			Уровень негативного физического воздействия (дополнительная характеристика)
			Воздух	Гидросфера	Почва	
Полимеризация	Этилен	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Триэтилалюминий	–	Средний	Низкий	Низкий	Высокий (самовоспламенение)
	Четыреххлористый титан	2	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (рефлекторное действие на человека)
	Бензин	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Циклогексан	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
Очистка продукта от катализатора	ПЭВП	4	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Триэтилалюминий	–	Средний	Низкий	Низкий	Высокий (самовоспламенение)
	Четыреххлористый титан	2	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (рефлекторное действие на человека)
	Бензин	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Циклогексан	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
Сушка	Метанол	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Азот	–	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий

Таблица 5. Ориентировочные количественные значения КЭБ для различных уровней локальных факторов экологического вреда на стадии производства материала

Уровень фактора	Значение КЭБ в зависимости от объекта воздействия				
	Воздух, $K_{\text{вф}}$	Гидросфера, $K_{\text{гф}}$	Почва, $K_{\text{пф}}$	Размещение отходов, $K_{\text{роф}}$	Негативное физическое воздействие, $K_{\text{нф}}$
Низкий	0–1	0–1	0–1	0–0,5	0–0,5
Средний	1–3	1–3	1–3	0,5–2	0,5–1
Высокий	3–5	3–5	3–5	2–4	1–1,8

трифугированием) и их прямая фильтрация от полиэтилена. Полученная суспензия, содержащая порядка 30-40 % растворителя и катализатора, отмывается метанолом с последующим отжатием. Увлажненный продукт поступает на сушку в сушильные камеры бункера, где полностью очищается на кипящем слое азота при температуре порядка 100 °С. Сухой порошок высыпается из бункера на пневмолинию, по которой отправляется на гранулирование.

Исходным сырьем для получения ПЭВП является очищенный газ этилен  $C_2H_4$ , образующийся в процессе пиролиза жидких дистиллятов нефти или низших насыщенных углеводородов. В качестве катализатора Циглера-Натта применяют обычно триэтилалюминий  $(C_2H_5)_3Al$  и четыреххлористый титан (тетрахлорид титана)  $TiCl_4$ . Триметилалюминий представляет собой жидкость, которая самовоспламеняется на воздухе.

Реакция идет в закрытом реакторе с циркуляцией вспомогательных компонентов (триэтилалюминий, четыреххлористый титан, бензин, циклогексан) по замкнутому циклу, что обеспечивает низкую степень воздействия реагирующих веществ на ОС. Однако здесь присутствуют два фактора, создающих угрозу загрязнения ОС.

1. Аппараты и реакторы в обязательном порядке оборудуются дыхательными клапанами, которыми они сообщаются с атмосферой.

2. Реагирующие вещества являются горючими или самовоспламеняющимися на воздухе и по пожарной опасности процессы полимеризации, разложения, отмывки катализатора и сушки полимера относятся к категории А.

Таким образом, технология производства ПЭВП обладает высокой пожаро- и взрывоопасностью и в силу этого характеризуется повышенной экологической опасностью.

В табл. 4 представлена матрица этапов технологического процесса производства ПЭВП и негативного экологического воздействия производства в зависимости от объекта воздействия (воздух, гидросфера, почва). Технологический процесс идет по замкнутому циклу, поэтому  $K_{ио\ i} = 0$  и в табл. 4 отсутствует. По

степени негативного воздействия на три основных компонента (объекта) ОС в табл. 4 приведены результаты качественного анализа с указанием уровня негативного физического воздействия (низкий, средний, высокий). Соответствие уровней их количественной оценке представлено в табл. 5. В принципе, данные, приведенные в этой таблице, можно применять для оценки КЭБ при анализе производства любых линейных полимеров.

Конкретные значения локальных КЭБ ( $K_{ив\ i'}$ ,  $K_{иг\ i'}$ ,  $K_{ин\ i'}$ ,  $K_{ио\ i'}$ ,  $K_{иф\ i'}$ ) следует рассчитывать по правилу смесей аналогично формуле (2) с учетом объемно-массового содержания используемых веществ. То есть степень учета влияния используемого вещества на локальный КЭБ прямо пропорциональна его массовой или объемной доле. После подстановки значений из табл. 4 и 5 в формулу (9) получим следующие значения для каждого из трех этапов технологического цикла получения ПЭВП:

- 1-й этап (полимеризация):  $K_{изг.мат1} = 1,67$ ;
- 2-й этап (удаление катализатора):  $K_{изг.мат2} = 1,91$ ;
- 3-й этап (сушка):  $K_{изг.мат3} = 0,51$ .

Просуммировав по формуле (8) эти значения КЭБ по этапам технологического цикла производства ПЭВП, получим, что  $K_{изг.мат\ ПЭ} = 4,09$ .

### 3.2. Полипропилен

В промышленности ПП получают полимеризацией пропилена в присутствии металлоорганических катализаторов преимущественно при низком давлении. Последовательность стадий производства ПП аналогична таковой для ПЭВП. При полимеризации в растворе в качестве растворителя используются гептан и низкооктановые фракции бензина. В качестве катализатора Циглера-Натта применяют смесь треххлористого титана  $TiCl_3$  с триэтилалюминием  $(C_2H_5)_3Al$ . Полимеризацию проводят при температуре 70–80 °С и 0,5–1,0 МПа. После отделения на центрифуге ПП отмывают от остатков катализатора спиртом, смесью воды со спиртом или пропиленоксидом. Порошкообразный полипропилен сушат, смешивают со стабилизаторами, красителями и затем гранулируют.

Таблица 6. Результаты оценки экологической опасности технологического процесса производства гранулята ПП

Технологический этап	Применяемое вещество	Класс опасности	Уровень фактора в зависимости от объекта воздействия			Уровень негативного физического воздействия (дополнительная характеристика)
			Воздух	Гидросфера	Почва	
Полимеризация	Пропилен	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Триэтилалюминий	–	Средний	Низкий	Низкий	Высокий (самовоспламенение)
	Треххлористый титан	–	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Бензин	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Гептан	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
Очистка продукта от катализатора	Полипропилен	3	Низкий	Низкий	Низкий	(Низкий)
	Триэтилалюминий	–	Средний	Низкий	Низкий	Высокий (самовоспламенение)
	Треххлористый титан	–	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Бензин	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Гептан	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Спирт	4	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
Сушка	Бензин, гептан	4	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (горючесть)
	Азот	–	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий

В табл. 6 приведена матрица, содержащая указания на применяемые вещества и вызываемые ими негативные воздействия на ОС.

Аналогично ПЭВП рассчитываются значения для каждого из трех этапов технологического цикла производства ПП и суммарная величина  $K_{изг.мат\ ПП}$ :

- 1-й этап (полимеризация):  $K_{изг.мат1} = 1,53$ ;
  - 2-й этап (удаление катализатора):  $K_{изг.мат2} = 1,35$ ;
  - 3-й этап (сушка):  $K_{изг.мат3} = 0,45$ .
- Суммарный КЭБ изготовления ПП  $K_{изг.мат\ ПП} = 3,33$ .

### 3.3. Поликарбонат

Производство гранулята ПК может быть реализовано с использованием нескольких технологий. Наиболее массовой из них является способ межфазной поликонденсации бисфенола А с фосгеном в среде водной щелочи и органического растворителя, например метилхлорида, или смеси хлорсодержащих растворителей.

Процесс получения ПК состоит из двух стадий. Первая – фосгенирование динатриевой соли бисфенола А с образованием олигомеров, содержащих реакционноспособные хлорформатные и гидроксильные концевые группы. В реактор, снабженный перемешивающим устройством, загружают водный раствор смеси динатриевой соли бисфенола А и фенола, метилхлорид и водный раствор  $NaOH$ . При непрерывном перемешивании и охлаждении (оптимальная температура 20–25 °С) вводят газообразный фосген. Реакцию ведут до достижения полной конверсии бисфенола А с образованием олигокарбоната.

Вторая стадия – поликонденсация олигомеров (катализатор – триэтиламин или четвертичные аммониевые основания) с образованием полимера. По-

дачу фосгена прекращают, в реактор добавляют триэтиламин и водный раствор гидроксида натрия и при перемешивании осуществляют поликонденсацию олигокарбоната до исчезновения хлорформатных групп. Полученную реакционную массу разделяют на две фазы: водный раствор солей, отправляемый на утилизацию, и раствор поликарбоната в метилхлориде. Последний отмывают от органических и неорганических примесей (последовательно 1–2 %-ным водным раствором  $NaOH$ , 1–2%-ным водным раствором ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$  и водой), концентрируют, удаляя метилхлорид, и выделяют поликарбонат осаждением или посредством перевода из раствора в расплав с помощью высококипящего растворителя, обычно хлорбензола.

С экологической точки зрения метод характеризуется большим расходом воды для промывки полимера и, следовательно, большим объемом сточных вод.

В табл. 7 приведены результаты анализа технологии производства ПК аналогично тем, что представлены в табл. 4 и 6. Отсюда можно определить следующие значения коэффициента  $K_{изг.мат}$  для каждого из двух этапов технологического цикла производства ПК:

- 1-й этап (фосгенирование):  $K_{изг.мат1} = 3,82$ ,
- 2-й этап (поликонденсация):  $K_{изг.мат2} = 2,52$ ,

а затем и суммарный КЭБ изготовления ПК:

$$K_{изг.мат\ ПК} = 6,34.$$

### 3.4. Поливинилхлорид

Производство гранулята ПВХ является двухстадийным химическим процессом. На первой стадии получают винилхлорид (хлористый винил), - мономер, представляющий собой бесцветный газ. Винилхлорид ( $C_2H_3Cl$ ) наиболее эффективно получают гидрохлорированием ацетилена хлористым водородом при тем-

Таблица 7. Результаты оценки экологической опасности этапов технологического процесса производства гранулята ПК

Технологический этап	Применяемое вещество	Класс опасности	Уровень фактора в зависимости от объекта воздействия				Уровень негативного физического воздействия (дополнительная характеристика)
			Воздух	Гидросфера	Почва	Размещение отходов*	
Фосгенирование динатриевой соли бисфенола А с образованием олигомеров	Динатриевая соль бисфенола А	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (канцерогенность)
	Фенол	2	Средний	Низкий	Низкий	Низкий	Средний (токсичность)
	Метилхлорид	4	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Гидроксид натрия	2	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий (едкое вещество, высокая коррозионность)
	Фосген	2	Высокий	Низкий	Низкий	Низкий	Высокий (токсическое действие, отек легких)
	Олигомер ПК	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
Поликонденсация олигомеров с образованием полимера	Триэтиламин	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий (токсичность)
	Поликарбонат	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Метилхлорид	4	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Ортофосфорная кислота	2	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий (коррозионность, токсичность)
	Хлорбензол	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий (токсичность, раздражающее действие)
	Водный раствор натриевых солей	–	Низкий	Низкий	Низкий	Средний	Низкий

\* Учитывает экологические проблемы, связанные с обращением с отходами производства (например, сточными водами, загрязненными растворами солей натрия).



пературе 160–200 °С и давлении 300–500 кПа в присутствии в качестве катализатора хлорида ртути (сулемы)  $HgCl_2$ . При температуре –13,9 °С винилхлорид конденсируется, переходя в жидкую форму. Для нейтрализации хлорида ртути реакционные газы подаются в специальную колонну, в которой орошаются распыленной соляной кислотой.

На второй стадии жидкий винилхлорид полимеризуется до ПВХ суспензионным методом. Полимеризация идет в каплях мономера, диспергированного в водной фазе. В мономере растворяется незначительное количество инициатора (персульфат аммония). Для предотвращения слипания мономер-полимерной смеси в водную фазу добавляются поверхностно-активные вещества. ПВХ получается в виде рыхлых частиц или порошка, которые поступают на гранулятор.

В табл. 8 приведены результаты анализа основных веществ, применяемых при производстве гранулята ПВХ. Возможные добавки (термостабилизаторы, пластификаторы, наполнитель (мел), антипирены и т.п.) обычно не содержатся в исходном грануляте, а добавляются непосредственно перед производством конкретных изделий из него, поэтому не учтены в табл. 8. В результате получаем следующие значения коэффициента  $K_{изг. мат}$  для каждого из двух этапов технологического цикла производства ПВХ:

- 1-й этап (получение винилхлорида):  $K_{изг. мат1} = 7,71$ ,
- 2-й этап (полимеризация):  $K_{изг. мат2} = 1,73$ ,

сложив которые, определим суммарный КЭБ изготовления ПВХ:  $K_{изг. мат ПВХ} = 9,44$ .

### 3.5. Полиэтилентерефталат

ПЭТ обычно получают поликонденсацией терефталевой кислоты (в виде бесцветных кристаллов) с этиленгликолем (жидкость) по периодической или непрерывной схеме в две стадии. По технико-

экономическим показателям преимущество имеет непрерывный процесс получения ПЭТ из кислоты и этиленгликоля. Этерификацию кислоты этиленгликолем (молярное соотношение компонентов от 1:1,2 до 1:1,5) проводят при 240–270 °С и давлении 0,1–0,2 МПа.

Первая стадия – поликонденсация – включает в себя несколько последовательных процессов, включая смешение всех компонентов (основного сырья, различных добавок, необходимых катализаторов) и этерификацию, представляющую собой процесс получения сложных эфиров из различных спиртов и кислот. Полученную смесь бис-(2-гидроксиэтил)терефталата с его олигомерами подвергают поликонденсации в нескольких последовательно расположенных аппаратах, снабженных мешалками, при постепенном повышении температуры от 270 до 300 °С и снижении давления разрежения от 6600 до 66 Па. Синтез полимеров сопровождается выделением побочных низкомолекулярных продуктов реакции. Заключает первую стадию производства ПЭТ процесс гранулирования, на котором из аморфного вязкого полимера получают бесцветные гранулы.

Вторая стадия получения ПЭТ является твердофазной поликонденсацией. Процесс представляет собой последовательное охлаждение и нагревание полученных гранул. Они нагреваются до высоких температур, что способствует повышению молекулярной массы продукта и, как следствие, увеличение степени вязкости полимера.

Результаты экологического анализа технологии получения гранулята ПЭТ представлены в табл. 9. Получаем следующие значения коэффициента  $K_{изг. мат}$  для каждого из двух этапов технологического цикла производства ПЭТ:

- 1-й этап (поликонденсация):  $K_{изг. мат1} = 2,02$ ,
- 2-й этап (твердофазная поликонденсация):  $K_{изг. мат2} = 0,39$ .

Таблица 8. Результаты оценки экологической опасности технологического процесса производства гранулята ПВХ

Технологический этап	Применяемое вещество	Класс опасности	Уровень фактора в зависимости от объекта воздействия			Уровень негативного физического воздействия (дополнительная характеристика)
			Воздух	Гидросфера	Почва	
Получение винилхлорида (гидрохлорирование ацетилена)	Ацетилен	4	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Винилхлорид	1	Высокий	Низкий	Низкий	Высокий (токсичность, канцерогенность)
	Хлористый водород (в виде газа)	3	Средний	Низкий	Низкий	Средний (токсичность, раздражающее действие)
	Хлорид ртути	1	Высокий	Средний	Средний	Высокий (высокая токсичность, мутагенное действие)
	Соляная кислота	3	Средний	Средний	Низкий	Средний (токсичность)
Полимеризация	ПВХ	2*	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
	Персульфат аммония	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий

\* Данные для пыли ПВХ по ОБУВ.

Таблица 9. Результаты оценки экологической опасности технологического процесса производства гранулята ПЭТ

Технологический этап	Применяемое вещество	Класс опасности	Уровень фактора в зависимости от объекта воздействия			Уровень негативного физического воздействия (дополнительная характеристика)
			Воздух	Гидросфера	Почва	
Поликонденсация	Терефталевая кислота	1	Средний	Низкий	Низкий	Средний (токсичность, горючесть)
	Этиленгликоль	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий
Твердофазная поликонденсация	Полиэтилентерефталат	3	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий (горючесть)

Отсюда вытекает, что суммарный КЭБ изготовления ПЭТ:  $K_{изг.мат. ПЭТ} = 2,41$ .

В табл. 10 и на рис. 3 приведены обобщенные данные по экологической безопасности получения сырья для последующего изготовления анализируемых термопластов.

### 3.6. Индекс экологической безопасности материалов

В табл. 11 и на рис. 4 представлены сводные сравнительные результаты определения экологической безопасности сырья, изготовления соответствующего полимера и собственно полимера, а также ИЭБМ. Значения ИЭБМ  $K_i$  рассчитаны по формуле (1).

Анализ полученных результатов позволяет сделать предположение об относительно низкой экологической опасности ПЭВП, ПП, ПК и ПЭТ для ОС, если рассматривать эти материалы как таковые, без учета экологического вреда и опасностей, связанных с их производством и исходным сырьем. Комплексный анализ показывает, что в 4–10 раз более высокая нагрузка на ОС по сравнению с готовым материалом

приходится на стадию получения гранулята из сырья. Особенно заметно это проявляется у ПК вследствие использования в химической технологии фосгена и фенола. Из рассмотренных линейных термопластов наибольшей экологической опасностью обладает ПВХ вследствие, прежде всего, использова-

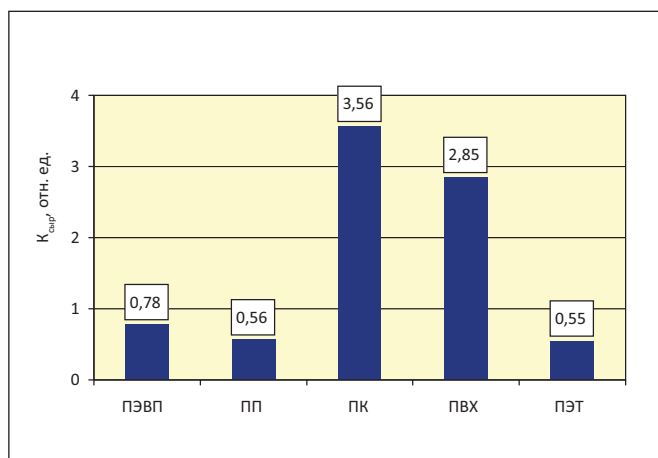


Рис. 3. Значения КЭБ  $K_{сыр}$  для различных анализируемых материалов

Таблица 10. Результаты оценки экологической опасности сырьевой составляющей производства анализируемых полимеров

Полимер	Исходное сырье	Конечное сырье	Уровень фактора в зависимости от объекта воздействия					$K_{кст}$	$K_{сыр}$
			Воздух	Гидросфера	Почва	Отходы	Физическое загрязнение		
ПЭВП	Нефть	Этилен	Н	Н	Н	Н	Н	0,50	0,78
	Нефть, Al, H <sub>2</sub>	Триэтилалюминий	С	Н	Н	Н	Н	1,85	
	Шлаки Ti, Cl <sub>2</sub>	Четыреххлористый титан	С	Н	Н	Н	Н	2,34	
	Нефть	Бензин	Н	Н	Н	Н	Н	0,85	
	Нефть	Циклогексан	Н	Н	Н	Н	Н	0,70	
	Природный газ, нефть, коксующийся уголь	Метанол	Н	Н	Н	Н	Н	0,29	
ПП	Нефть	Пропилен	Н	Н	Н	Н	Н	0,34	0,56
	Нефть, Al, H <sub>2</sub>	Триэтилалюминий	С	Н	Н	Н	Н	2,21	
	Ti, HCl	Треххлористый титан	С	Н	Н	Н	Н	2,28	
	Нефть	Бензин	Н	Н	Н	Н	Н	0,85	
	Нефть	Гептан	Н	Н	Н	Н	Н	0,44	
	Нефть (газы крекинга)	Спирт	Н	Н	Н	Н	Н	0,04	
ПК	Нефть	Динатриевая соль бисфенола А	С	Н	Н	Н	Н	2,34	3,56
	Нефть	Фенол	С	Н	Н	Н	Н	1,96	
	Метан, Cl <sub>2</sub>	Метиленхлорид	С	Н	Н	Н	Н	1,26	
	СО, Cl <sub>2</sub> , древесный уголь	Фосген	В	Н	Н	Н	В	6,62	
	Фосфаты	Ортофосфорная кислота	Н	С	Н	Н	Н	1,12	
	Нефть, Cl <sub>2</sub>	Хлорбензол	С	Н	Н	Н	Н	1,56	
ПВХ	Карбид кальция	Ацетилен	Н	Н	Н	Н	Н	0,44	2,85
	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	Хлористый водород (в виде газа)	С	С	Н	Н	Н	2,75	
	Hg, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaCl	Хлорид ртути	В	С	С	Н	В	9,20	
	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	Соляная кислота	С	С	Н	Н	Н	2,45	
	Аммиак, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Персульфат аммония	Н	Н	Н	Н	Н	0,34	
ПЭТ	Нефть, O <sub>2</sub>	Терефталевая кислота	Н	Н	Н	Н	С	0,67	0,55
	Нефть, O <sub>2</sub>	Этиленгликоль	Н	Н	Н	Н	Н	0,17	

Примечание. Н – низкий, С – средний, В – высокий.

Таблица 11. Результаты определения экологической безопасности сырья, изготовления полимера и собственно полимера, а также ИЭБМ

Полимер	Экологическая безопасность сырья, $K_{сыр}$	Экологическая безопасность изготовления, $K_{изг.мат}$	Экологическая безопасность полимера, $K_{мат}$	ИЭБМ, $K_i$
ПЭВП	0,78	4,09	0,98	5,85
ПП	0,56	3,33	1,36	5,25
ПК	3,56	6,34	0,63	10,53
ПВХ	2,85	9,44	8,33	20,62
ПЭТ	0,55	2,41	0,80	3,76

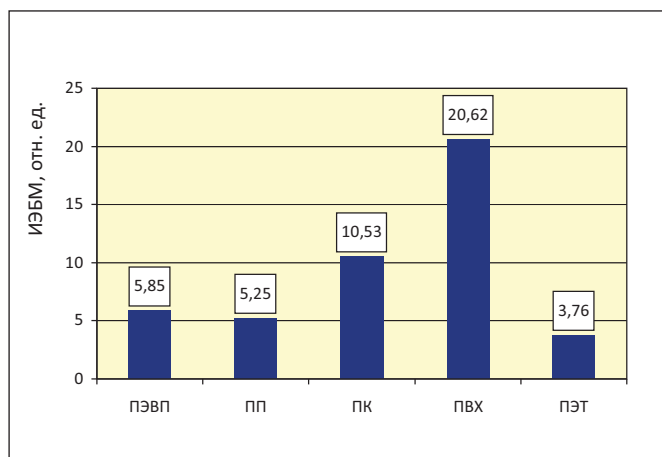


Рис. 4. Значения ИЭБМ для различных анализируемых материалов

ния в технологии его производства хлорида ртути и винилхлорида, относящихся к первому классу опасности, а также высокой токсичности продуктов термического разложения полимера (диоксины, бензопирен, хлорводород и др.).

### Выводы

Данные, полученные при расчете индекса экологической безопасности материала (ИЭБМ) линейных полимеров по предлагаемой в работе методике, подтверждают возможность объективной оценки экологических свойств материалов. Можно предположить, что такой подход будет справедлив и по отношению к другим видам материалов, включая металлы.

Применение ИЭБМ и промежуточных коэффициентов экологической безопасности (КЭБ) позволяет оценить степень экологической опасности производства различных материалов, дает возможность сопоставить материалы между собой с точки зрения экологической безопасности. Особенно перспективным представляется применение ИЭБМ для выбора способа производства материала из множества возможных или осуществления на стадии проектирования изделия оптимального выбора материала из ряда марок, отличающихся лишь способом получения, для снижения нагрузки на ОС. Для линейных полимеров последнее является весьма актуальным.

Предлагаемая методика расчета ИЭБМ позволяет сократить сроки подготовки производства и оптимизации технологических процессов получения полимерных материалов по экологическим показателям, повысить экологическую безопасность производства.

### Литература

1. Дмитренко В. П., Горбачев С. И., Булычев С. Н. и др. Методы оценки экологической безопасности конструкционных материалов // Безопасность в техносфере. – 2016. – № 6 (63). – С. 38–47.
2. Колерт К. Экологическая оценка упаковок, изготовленных из различных материалов // Полимерные материалы. – 2008. – № 6. – С. 4–10.
3. Дмитренко В. П., Мануйлова Н. Б., Булычев С. Н., Горбачев С. И. К вопросу экологической безопасности конструкционных материалов // Безопасность в техносфере. – 2016. – № 1 (58). – С. 12–18.
4. Дмитренко В. П., Горбачев С. И., Булычев С. Н. и др. Критерии оценки экологической безопасности конструкционных материалов / Сб. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды», г. Белгород, 6–8 декабря 2016 г. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – С. 86–90.
5. Дмитренко В. П., Булычев С. Н., Горбачев С. И. и др. Определение коэффициента экологической безопасности конструкционных материалов // Научный альманах. – 2017. – № 1–3 (27). – С. 49–52. DOI: 1017117/na.2017.01.03.049.
6. 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).
7. Дмитренко В. П., Мессинева Е. М., Фетисов А. Г. Управление экологической безопасностью в техносфере. – СПб.: Издательство «Лань», 2015. – 420 с.
8. Дмитренко В. П., Сотникова Е. В., Кривошеин Д. А. Экологическая безопасность в техносфере. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 514 с.
9. Химическая энциклопедия: В 5 т. / Гл. ред. И. Л. Кнунянц [до 1992 г.], Н. С. Зефирова [с 1995 г.]. – М.: Сов. энцикл.; Большая Рос. энцикл., 1988–1998.
10. Кривошеин Д. А., Дмитренко В. П., Федотова Н. В. Основы экологической безопасности производств. – СПб.: изд-во «Лань», 2015. – 336 с.
11. Дмитренко В. П., Мануйлова Н. Б. Материаловедение в машиностроении. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 432 с.

### Evaluation of Ecological Safety of Thermoplastic Polymer Materials

(Continued from PM No. 6 2017)

V. P. Dmitrenko, S. I. Gorbachev, S. N. Bulychev,  
N. B. Manuylova, E. M. Messineva, E. Y. Murmantseva

The problems of ecological safety of the most widely used linear polymer materials are considered. A comparative analysis of the negative impact on the environment based on the calculation of the environmental safety index of the material was carried out. The assessment is of an integral nature and takes into account the raw materials, the chemical technology of polymer production and the production of granulate. ■