

# Оценка экологической безопасности силовых установок с дизельными двигателями

**В.А. Марков**, д-р техн. наук, профессор<sup>1</sup>

**С.Н. Девянин**, зав. кафедрой, д-р техн. наук, профессор<sup>2</sup>

**В.В. Маркова**, преподаватель, канд. техн. наук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им.Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина

**e-mail:** markov@power.bmstu.ru

## Ключевые слова:

дизельный двигатель,  
дизельное топливо,  
подсолнечное масло,  
токсичность отработавших газов.

*Представлены токсикологические свойства отработавших газов дизельных двигателей, в частности полициклических ароматических углеводородов, состав отработавших газов дизелей, методика оценки токсичности отработавших газов дизельных двигателей, работающих на различных видах топлива. Показаны преимущества использования в дизелях биотоплива, производимого на основе растительных масел.*

## 1. Введение

Работа транспортных дизелей оценивается комплексом эксплуатационно-технических данных: удельной мощностью и массогабаритными показателями, топливной экономичностью, токсичностью отработавших газов (ОГ), динамическими качествами и др. [1]. Важнейшими из них в настоящее время являются показатели токсичности ОГ, т.е. количество выбрасываемых двигателем вредных веществ. Это обусловлено как ухудшением экологической обстановки, так и ужесточением требований, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания современными нормативными документами на токсичность ОГ [2].

В настоящее время отечественный автомобильный парк ежегодно выбрасывает в атмосферу 13–15 млн т оксидов углерода и 1,2–1,5 млн т оксидов азота. При этом до 22% всех выбросов диоксида углерода, около 50% веществ, вызывающих кислотность атмосферы, и 60–90% смога приходится на эмиссию вредных веществ с ОГ транспортных средств. Особенно тяжелая экологическая обстановка складывается в крупных городах. Например, в Москве годовые суммарные выбросы вредных веществ автотранспортом достигают 1,7 млн т. Данные о загрязнении атмосферы двигателями внутреннего сгорания, работающими на нефтяном топливе — бензине и дизельном топливе, приведены в табл. 1 [3]. При этом отмечается непрерывный рост доли дизельных дви-

гателей в общем объеме выпускаемых транспортных двигателей внутреннего сгорания [4].

Для оценки относительной агрессивности отдельных токсичных компонентов в [5] использован условный коэффициент агрессивности  $A_p$ , который учитывает отношение ПДК рассматриваемого компонента к ПДК монооксида углерода в воздухе рабочей зоны. Он учитывает также вероятность накопления в атмосфере вредных веществ, их вторичных химических превращений, оседание твердых частиц на поверхность земли, воздействие токсичных компонентов ОГ на сельскохозяйственные растения и животных. Среди токсичных компонентов ОГ дизельных двигателей

Таблица 1  
Выброс вредных веществ  
бензиновыми и дизельными двигателями

Вредное вещество	Выброс вредных веществ [кг] на 1 т топлива, сжигаемого в двигателе	
	бензиновый двигатель	дизельный двигатель
Оксиды азота $NO_x$	20	33
Монооксид углерода CO	395	9
Углеводороды $CH_x$	34	20
Оксиды серы $SO_x$	1,6	6,0
Альдегиды, органические кислоты	1,4	6,1
Твердые частицы	2	16

Таблица 2

**Относительная токсичность компонентов ОГ дизелей и их относительный условный коэффициент агрессивности**

Компонент ОГ	Относительная токсичность компонентов ОГ с учетом ПДК, ПДК <sub>CO</sub> / ПДК <sub>i</sub>			Относительный условный коэффициент агрессивности $A_i$
	средне-суточная ПДК	ПДК рабочей зоны	максимальная разовая ПДК	
Монооксид углерода CO	1	1	1	1,0
Оксиды азота NO <sub>x</sub>	75	10	58,8	41,1
Углеводороды CH <sub>x</sub>	2	0,5	1	3,16
Твердые частицы (сажа С)	60	5	33,3	300 (бензины) 200 (дизельные топлива)
Оксиды серы SO <sub>x</sub>	60	2	10	22

*Примечание.* ПДК<sub>CO</sub> – предельно допустимая концентрация монооксида углерода в воздухе рабочей зоны; ПДК<sub>i</sub> – предельно допустимая концентрация рассматриваемого компонента в воздухе рабочей зоны.

одним из наиболее значимых компонентов считаются твердые частицы, состоящие преимущественно из сажи. Для сажи условный коэффициент агрессивности составляет  $A_i = 200$  (при работе на дизельном топливе, табл. 2), для оксидов азота NO<sub>x</sub> этот коэффициент равен 41,1, для монооксида углерода CO — 1,0, для несгоревших углеводородов CH<sub>x</sub> — 3,16. Такой высокий коэффициент агрессивности сажи обусловлен косвенным учетом присутствия на частицах сажи полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и других вредных веществ.

## 2. Полициклические ароматические углеводороды – ПАУ

В последние годы опубликованы работы, указывающие на серьезную опасность выбросов ПАУ с ОГ ДВС для организма человека [6, 7, 8, 9, 10]. Однако напрямую наличие в ОГ полициклических ароматических углеводородов не учитывается (их наличие характеризуется лишь высоким коэффициентом агрессивности сажи  $A_i = 200$ ). Поэтому при разработке методики оценки экологической безопасности силовых установок с дизельными двигателями необходимо напрямую учесть выбросы этих токсикологически значимых компонентов ОГ.

Известны тысячи полициклических ароматических соединений, каждое из которых отличается как количеством и расположением ароматических колец, так и расположением различных боковых цепей, представляющих собой углеводородные радикалы типа CH<sub>3</sub> (метильный радикал), C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> (этиловый радикал)

и др. В выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания обнаружено более 20 различных ПАУ. В ОГ дизелей содержатся углеводороды, в молекулы которых входят две, три и четыре кольцевые структуры и 12–20 атомов углерода. Наиболее представительны из них неканцерогенные пирен, флуорантен и слабо-токсичный хризен, а наиболее опасные — имеющий сравнительно высокую концентрацию в ОГ фенантрен C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>, бензо(b)флуорантен, бензо(j)флуорантен, бензо(k)флуорантен, дибенз(a,h)антрацен, дибенз(a,i)антрацен, дибензо(a,h)пирен, дибензо(a,i)пирен, но особенно — бензо(a)пирен C<sub>20</sub>H<sub>12</sub> [11, 12, 13]. Бензо(a)пирен, несмотря на его невысокую концентрацию в ОГ, наиболее токсичный и стабильный из перечисленных углеводородов. Доля бензо(a)пирена в суммарном выбросе ПАУ составляет до 3,7% у дизелей и 2,1–3,3 % — у бензиновых двигателей. Дизельное топливо может содержать до 1–4% полициклических ароматических углеводородов [14]. В отличие от нефтяных топлив растительные масла практически не содержат ПАУ [4], что и обуславливает существенно меньшее содержания ПАУ в ОГ дизелей, работающих на биотопливах, получаемых из растительных масел.

Структуры различных ПАУ представлены на рис. 1 [9, 11, 10, 15]. Основу ПАУ составляет структура, называемая бензольным ядром, в которую входят шесть атомов углерода, соединенных в кольцо, с тремя одинарными и тремя двойными связями. Некоторые ПАУ кроме бензольных шестигранных структур ядра включают пятигранную кольцевую структуру — циклопентановое кольцо (см. молекулы индена, аценафтилена, аценафтена и др. на рис. 1), одну или несколько боковых цепей (см. молекулы 1-метилнафталина, 2-метил-1-этилнафталина, 9-метилантрацена и др. на рис. 1). В молекулах ароматических соединений могут находиться и кольцевые структуры, содержащие атомы не только углерода и водорода, но и других элементов (кислорода, азота или серы — см. молекулы дибензофурана, 1,2,5,6-дибензакридина на рис. 1). Последние из перечисленных соединений называют гетероароматическими или гетероциклическими соединениями.

Полициклические ароматические углеводороды присутствуют в нефти, каменном угле, отложениях смолы, а также образуются как побочные продукты при сгорании топлива (вне зависимости ископаемое это топливо или полученное из биомассы). Эти углеводороды образуются в результате пиролиза или неполного сгорания органического вещества, содержащего углерод и водород. При высоких температурах в результате пиролиза органических соединений образуются фрагменты молекул и радикалы, которые соединяются и образуют ПАУ. Состав конечного продукта пиролизного синтеза зависит от топлива, температуры и времени пребывания в зоне горения.

Максимальное содержание ПАУ в ОГ отмечается при температуре 1800–2000 К [16].

К моторным топливам, после сгорания которых образуются ПАУ, относится не только дизельное топливо, но и бензин, биотоплива, метан, другие углеводороды. Но при этом соединения моторных топлив, содержащие разветвление цепи, ненасыщенные связи или циклические структуры, обычно благоприятствуют образованию ПАУ, которые выделяются в виде паров из зоны горения. Из-за низкого давления их насыщенных паров большинство ПАУ мгновенно концентрируются на частичках сажи либо сами образуют мельчайшие частички.

Полициклические ароматические углеводороды, поступающие в рабочую смесь в виде паров, адсорбируются содержащимися в воздухе частицами. Таким образом, содержащие ПАУ аэрозоли, выбрасываемые с ОГ двигателей, могут переноситься ветром на большие расстояния, загрязняя окружающую среду.

Физико-химические свойства ПАУ в значительной степени обусловлены строением их молекул, в которые входят две и более кольцевые структуры (см. рис. 1). Так, например, молекулы индена  $C_9H_8$  включают соединенные между собой пятичленную и шестичленную кольцевые структуры. Молекулы нафталинов содержат два объединенных бензоль-

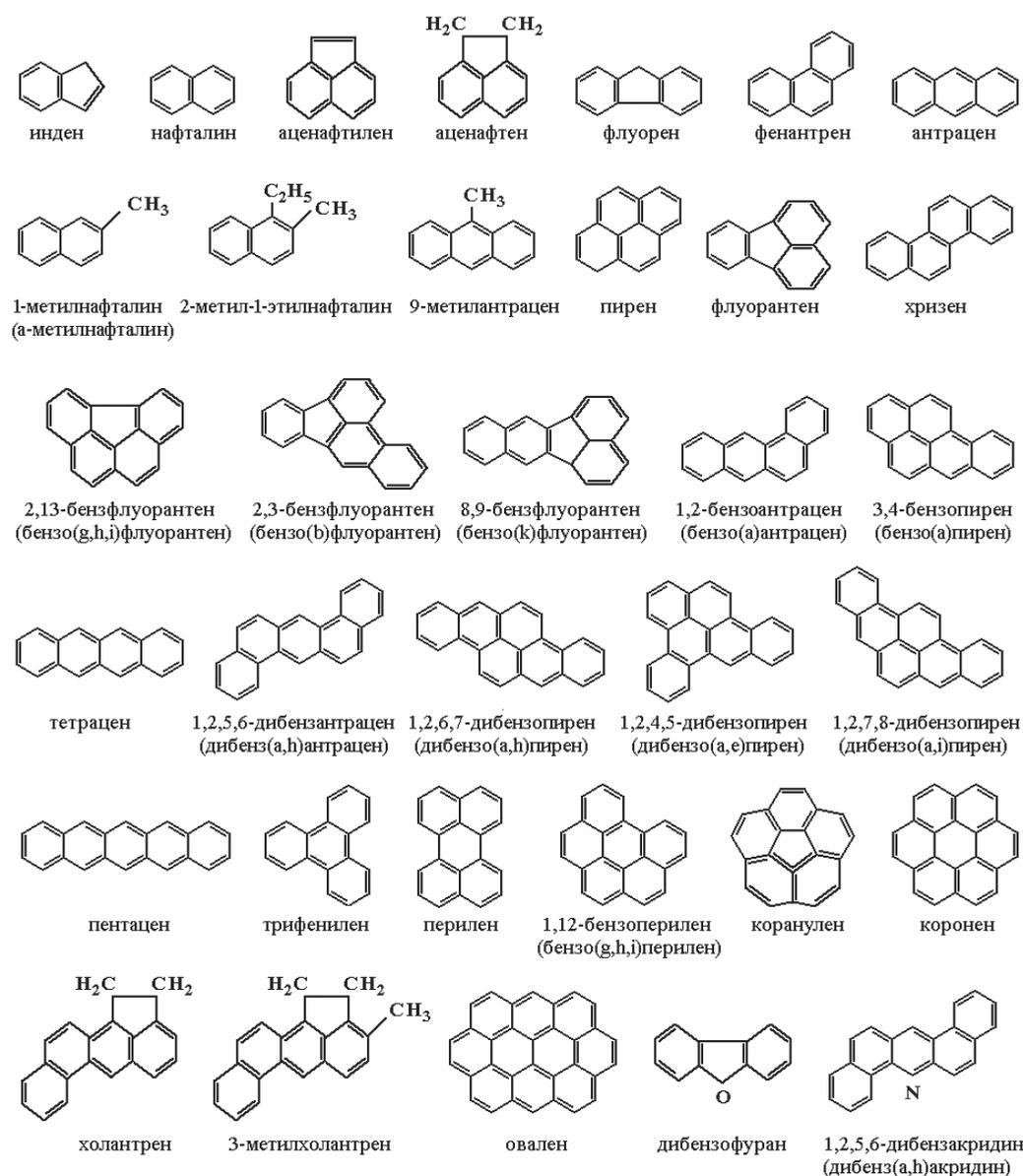


Рис. 1. Молекулярные структуры полициклических ароматических углеводородов

ных кольца, не склонных к распаду в камерах сгорания (КС) дизелей. При этом химическая стабильность ПАУ объясняется наличием сопряженных электронов в сочленениях этих кольцевых структур. Поэтому нафталины имеют более низкие цетановые числа (ЦЧ) по сравнению с углеводородами парафинового, олефинового и нафтенового рядов (групп). В частности, ЦЧ 1-метилнафталин ( $\alpha$ -метилнафталин)  $C_{11}H_{10}$  принимается равным нулю и применяется в качестве эталона при оценке воспламеняемости дизельных топлив. Из-за низкой воспламеняемости полициклические ароматические углеводороды, содержащиеся в топливе, не сгорают полностью в КС дизелей, что приводит к повышенному содержанию сажи в ОГ. Следует также отметить повышенное по массе содержание углерода С и пониженное содержание водорода Н (большое значение отношения С/Н) в молекулах ПАУ. Это приводит к тому, что теплота сгорания ПАУ заметно меньше теплоты сгорания других групп углеводородов (парафинов, олефинов, нафтенов).

В нормальных условиях ПАУ представляют собой твердые вещества с очень низкой летучестью. При химических реакциях происходит замещение атома водорода либо происходят присоединительные реакции, при которых наблюдается насыщение молекул. В целом, система колец сохраняется. ПАУ растворимы во многих органических растворителях, но растворимость в воде очень низкая и уменьшается с возрастанием веса молекулы.

### 3. Токсикологическое действие ПАУ

Некоторые ПАУ (особенно бензо(а)пирен  $C_{20}H_{12}$ ) обладают ярко выраженными канцерогенными свойствами. То, что канцерогенные ПАУ вступают в реакцию с другими веществами, не обязательно означает, что они инактивируются как канцерогенные вещества; напротив, многие ПАУ, содержащие заместители, намного более канцерогенны, чем соответствующее материнское соединение. Так, при наличии в ОГ других канцерогенов, олефиновых углеводородов  $CH_x$  и оксидов азота  $NO_x$  неканцерогенные ПАУ в ряде случаев становятся более опасными, чем канцерогенные ПАУ. Они способствуют образованию особо ядовитых нитропроизводных ПАУ [17, 18]. Большинство ПАУ фотоокисляемы. Реакция фотоокисления имеет большое значение для удаления ПАУ из атмосферы.

Рассмотрим более подробно токсикологическое действие ПАУ на организм человека. ПАУ являются токсичными веществами и при вдыхании воздуха, содержащего их, немедленно воздействуют на слизистые оболочки, на кожу, центральную нервную и мышечную системы, вызывают желудочно-кишечные расстройства, воздействуют на процессы кровообра-

щения, вызывая острую гемолитическую анемию, сопровождающуюся повреждением печени и почек (табл. 3). Эти канцерогены оказывают отдаленное во времени мутагенное или тератогенное воздействие, вызывая генетические нарушения в отношении широкого ряда организмов [17, 19, 20, 21].

Низкомолекулярные ароматические углеводороды, как правило, не канцерогенны. ПАУ с более высокой молекулярной массой, содержащие от 4 до 7 колец, обычно менее токсичны, но многие из них канцерогенны, особенно ПАУ, содержащие от четырех до шести ароматических колец. Наиболее выраженное канцерогенное воздействие оказывают бензо(а)пирен, а также бензо(б)флуорантен, бензо(г)флуорантен, бензо(к)флуорантен, дибенз(а, h)пирен, холантрен (табл. 4) [13].

При попадании в организм полициклические углеводороды под действием ферментов образуют эпокси-соединение, реагирующее с гуанином, что препятствует синтезу ДНК, вызывает нарушение или приводит к возникновению мутаций, а как следствие, к развитию раковых заболеваний. Канцерогенные свойства ПАУ настолько выражены, что даже при периодическом контакте кожи человека с этими углеводородами, содержащимися в топливе, отмечены предраковые образования кожи — кератозы, папилломы и др.

Среди полициклических ароматических углеводородов наиболее сильным канцерогеном является бензо(а)пирен  $C_{20}H_{12}$ . В нормальных условиях это кристаллическое вещество, а в ОГ дизеля он может находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии [22]. Бензо(а)пирен (как и некоторые другие ПАУ, см. табл. 4), содержащийся в воздухе, при его вдыхании человеком воздействует на процессы кровообращения, центральную нервную и мышечную системы. Бензо(а)пирен может попадать в организм человека и через кожный покров. Кроме того, вместе с осадками бензо(а)пирен попадает в почву и водоемы и откладывается в растительной массе сельскохозяйственных культур. В частности, наибольшие концентрации бензо(а)пирена отмечаются в пробах белокочанной капусты [2]. При потреблении сельскохозяйственной продукции человеком ПАУ аккумулируются клетками, постепенно накапливаясь до критических концентраций. Как отмечено выше, ПАУ обладает и отдаленным во времени действием — вызывает генетические нарушения и родовые дефекты.

### 4. Содержание ПАУ в отработавших газах дизелей

Исследованию содержания ПАУ в ОГ дизельных двигателей посвящено большое количество работ. При этом рассматривались как двигатели, работающие на традиционных видах нефтяного топлива [11, 13, 23, 24], так и двигатели, работающие на альтерна-

Токсикологические свойства ПАУ и их опасность для здоровья

ПАУ	Формула состава	Класс опасности	ПДК рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Немедленное воздействие	Отдаленное воздействие	Пути воздействия и симптомы
Нафталин	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	IV	20	Центральная нервная система, почки, желудочно-кишечный тракт	Лейкоцитоз	Желудочно-кишечные расстройства, острая гемолитическая анемия, сопровождающаяся повреждением печени и почек
1-метилнафталин	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	IV	20	Центральная нервная система, почки, желудочно-кишечный тракт	Лейкоцитоз	Желудочно-кишечные расстройства, острая гемолитическая анемия, сопровождающаяся повреждением печени и почек
Аценафтилен	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	—	—	—	—	Действует на кожу, слизистые оболочки
Аценафтен	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	III	10	—	—	Действует на почки, печень
Фенантрен	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	II	0,8	—	Сильный канцероген	Лейкоцитоз, нарушения функции печени
Антрацен	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	—	—	Глаза, кожа, дыхательные пути, желудочно-кишечный тракт	Фотодерматит, эритема	Ингаляция: кашель, затрудненное дыхание, воспаление горла. Кожный покров: может впитываться, покраснение. Глаза: покраснение, боль. Прием внутрь: абдоминальные боли
Пирен	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	I	0,03	—	Неканцерогенный	Лейкоцитоз, нарушения функции печени
Флуорантен	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	—	—	—	Неканцерогенный	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля
Бензо( <i>g,h,i</i> )-флуорантен	C <sub>18</sub> H <sub>10</sub>	—	—	Данных о воздействии на организм недостаточно	Неканцерогенный	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля и через кожу
Бензо( <i>a</i> )-антрацен	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	—	—	—	Слабый канцероген	Кожный покров: может впитываться
Хризен	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	—	—	—	Характеризуется слабой канцерогенной активностью	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля
Бензо( <i>a</i> )пирен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	I	0,00015	—	Очень сильный канцероген. Вызывает генетические нарушения и родоые дефекты	Воздействие на процессы кровообращения, центральную нервную и мышечную системы
Бензо( <i>b</i> )-флуорантен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	—	—	—	Сильный канцероген, вызывает генетические нарушения	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля и через кожу
Бензо( <i>j</i> )-флуорантен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	—	—	—	Сильный канцероген, вызывает генетические нарушения	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля и через кожу
Бензо( <i>k</i> )-флуорантен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	—	—	—	Сильный канцероген, вызывает генетические нарушения	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля и через кожу
Холантрен	C <sub>20</sub> H <sub>14</sub>	—	—	—	Сильный канцероген	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля
3-метилхолантрен	C <sub>21</sub> H <sub>16</sub>	—	—	—	Сильный канцероген	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля
Бензо( <i>g,h,i</i> )-перилен	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	—	—	—	Токсикологическое действие не изучено	Кожный покров: может впитываться
Дибенз( <i>a,h</i> )-антрацен	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	—	—	Глаза; кожа; дыхательные пути	Сильный канцероген. Воздействие на кожу	Кожный покров: фото-сенсбилизация. Глаза: покраснение, боль
Дибенз( <i>a,i</i> )-антрацен	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	—	—	—	Сильный канцероген	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля
Дибензо( <i>a,h</i> )-пирен	C <sub>24</sub> H <sub>14</sub>	—	—	—	Сильный канцероген	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля
Дибензо( <i>a,i</i> )-пирен	C <sub>24</sub> H <sub>14</sub>	—	—	—	Сильный канцероген	Всасывается в организм при вдыхании аэрозоля

Примечание: «—» — данные отсутствуют или не приведены.

Канцерогенные свойства ПАУ

ПАУ	Формула состава	Молекулярная масса	Сокращенное обозначение	Канцерогенность
Пирен	$C_{16}H_{10}$	202,26	PYR	Неактивный
Флуорантен	$C_{16}H_{10}$	202,26	FLU	Неактивный
Бензо( <i>g,h,i</i> )флуорантен	$C_{18}H_{10}$	226,29	BGF	Неактивный
Бензо( <i>a</i> )антрацен	$C_{18}H_{12}$	228,30	BAA	Слабоактивный
Трифенилен	$C_{18}H_{12}$	228,30	–	Неактивный
Хризен	$C_{18}H_{12}$	228,30	CHR	Слабоактивный
Бензо( <i>b</i> )флуорантен	$C_{20}H_{12}$	252,32	BFL	Сильноактивный
Бензо( <i>j</i> )флуорантен	$C_{20}H_{12}$	252,32	BFL	Сильноактивный
Бензо( <i>k</i> )флуорантен	$C_{20}H_{12}$	252,32	BFL	Сильноактивный
Бензо( <i>a</i> )пирен	$C_{20}H_{12}$	252,32	BAP	Сильноактивный
Бензо( <i>e</i> )пирен	$C_{20}H_{12}$	252,32	BEP	Очень слабоактивный
Перилен	$C_{20}H_{12}$	252,32	PER	Неактивный
Индено(1,2,3, <i>cd</i> )пирен	$C_{22}H_{12}$	276,34	IND	Слабоактивный
Бензо( <i>g,h,i</i> )перилен	$C_{22}H_{12}$	276,34	BGP	Слабоактивный
Дибенз( <i>a,h</i> )антрацен	$C_{22}H_{14}$	278,35	DBA	Слабоактивный
Дибенз( <i>a,i</i> )антрацен	$C_{22}H_{14}$	278,35	DBAI	Слабоактивный
Коронен	$C_{24}H_{12}$	300,36	COR	Очень слабоактивный

тивных видах топлива, в частности, на биотопливе [14, 16, 25, 26]. В [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33] представлены результаты экспериментальных исследований целого ряда дизельных двигателей. Среди исследованных наибольшее массовое содержание в ОГ имеют следующие ПАУ: флуорантен, пирен, антрацен, фенантрен, флуорен. Это подтверждается приведенными в [34] данными (табл. 5).

Более подробные данные о процентном содержании различных ПАУ в ОГ дизельных двигателей приведены на рис. 2 [34]. Эти данные подтверждают, что среди ПАУ, содержащихся в ОГ дизелей, наиболее представительны флуорантен, пирен, хризен, бенз(*a*)антрацен и бенз(*g,h,i*)перилен. При этом необходимо отметить, что для этих ПАУ их максимальное содержание в ОГ отмечается на режимах с частичными и малыми нагрузками, отличающихся низким качеством процесса смесеобразования [31].

Приведенные выше данные свидетельствуют о серьезной опасности, которую представляют полици-

клические ароматические углеводороды для здоровья человека, о необходимости разработать методику оценки экологической безопасности силовых установок с автотракторными двигателями, работающими на различных видах топлива (включая биотопливо), с учетом выбросов ПАУ с ОГ. При разработке такой методики учитывалось, что индивидуальные углеводороды, присутствующие в ОГ дизельных двигателей, имеют различную токсикологическую значимость [2, 35], причем она может быть охарактеризована действующими предельно-допустимыми концентрациями токсичных веществ в воздухе рабочей зоны. Следует отметить, что простейший полициклический ароматический углеводород — нафталин  $C_{10}H_8$  — имеет ПДК рабочей зоны, равную  $ПДК_{C_{10}H_8} = 20 \text{ мг/м}^3$ . Его токсикологическая значимость принята за базовую, а токсикологическая значимость других ПАУ приводится к нафталину.

При таком подходе выражение для приведенной концентрации *i*-го полициклического ароматического углеводорода  $C_i$  (учитывающей его относи-

Таблица 5

Концентрация ПАУ в ОГ дизельных двигателей (по данным различных авторов), мкг/м<sup>3</sup>

Полициклические ароматические углеводороды	Концентрация ПАУ в ОГ					
	Israel [29]	Mills [31]	Lopes [30]	Williams [33]	Abbass [28]	Wajsman [32]
Флуорен	–	40	1,2	–	–	32,3
Фенантрен	–	100	1,0	74	59	89
Антрацен	–	10	0,1	–	–	13,2
Флуорантен	42	20	0,1	74	42	4,3
Пирен	39	10	0,07	78	30,8	14,24

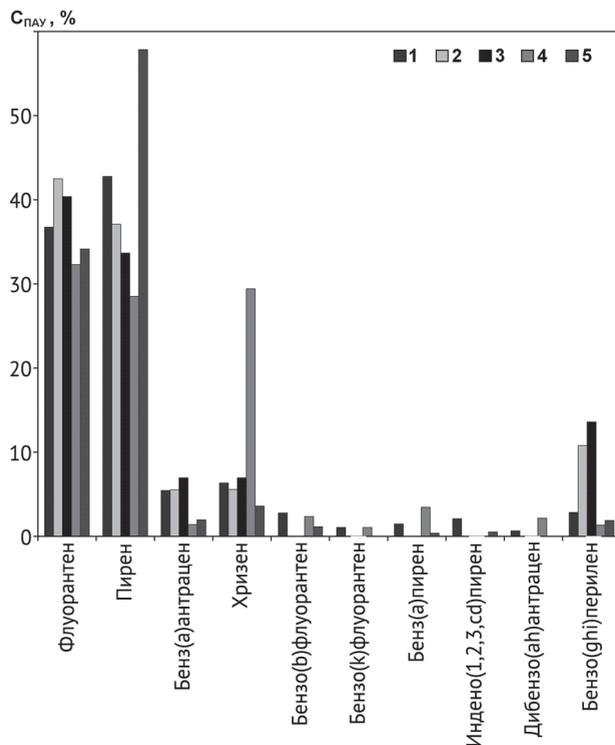


Рис. 2. Процентное содержание различных ПАУ в ОГ дизелей по различным источникам: 1 – *Lopes*; 2 – *Mills* (топливо, содержащем 10% ароматических углеводородов); 3 – *Mills* (топливо, содержащее 30% ароматических углеводородов); 4 – *Wajzman* (1995 г.); 5 – *Wajzman* (1996 г.).

тельную агрессивность по сравнению с нафталином) можно оценить по формуле:

$$\bar{C}_i = \frac{\text{ПДК}_{\text{C}_{10}\text{H}_8}}{\text{ПДК}_i} C_i, \quad (1)$$

где  $\text{ПДК}_{\text{C}_{10}\text{H}_8}$ ,  $\text{ПДК}_i$  — предельно допустимые концентрации нафталина  $\text{C}_{10}\text{H}_8$  и  $i$ -го полициклического ароматического углеводорода;  $C_i$  — концентрация последнего в ОГ. Просуммировав эти относительные приведенные концентрации отдельных ПАУ, получим показатель, характеризующий суммарное содержание полициклических ароматических углеводородов в ОГ двигателей внутреннего сгорания с учетом их различной токсикологической значимости. Этот показатель отражает экологичность сжигания в двигателях того или иного вида топлива, что позволяет использовать его для сравнительной оценки экологических качеств различных видов топлива.

Для оценки эффективности использования этого показателя и сравнительной оценки экологической опасности ОГ дизельного двигателя, работающего на нефтяном дизельном топливе и топливах, получае-

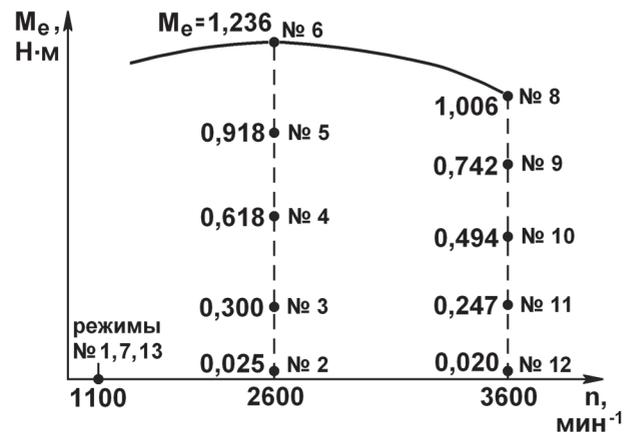


Рис. 3. Испытательный цикл JA 349 (13-ступенчатый)

мых из растительных масел, использованы данные, приведенные в [14]. В этой работе отражены результаты испытаний одноцилиндрового дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива, степенью сжатия  $\epsilon = 19$  и углом опережения впрыскивания топлива  $\theta = 30^\circ$  поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (ВМТ). Двигатель исследовался на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла JA 349, показанного на рис. 3.

Исследуемый двигатель работал на нефтяном дизельном топливе (ДТ), рафинированном, очищенном от щелочей подсолнечном масле (ПМ), а также на смеси этих топлив в пропорции 50% ДТ и 50% ПМ (по объему). Физико-химические свойства исследуемых видов топлива приведены в табл. 6.

При экспериментальных исследованиях дизеля на моторном стенде проводился газовый анализ ОГ с определением содержания в ОГ основных нормируемых токсичных компонентов, а также различных углеводородов. Описание экспериментальной уста-

Таблица 6  
Физико-химические свойства видов топлива

Физико-химическое свойство	Топливо	
	ДТ	ПМ
Цетановое число	45,4	39,5
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	850	920
Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с при 38 °С	2,4	29,4
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,7	37,0
Температура застывания, °С	-50,0	-23,3
Содержание, % по массе:		
С	86,9	78,2
Н	12,5	11,6
О	0,6	10,2
Общее содержание серы, % по массе	0,20	0,5
Зольность, %	< 0,01	0,01
Содержание воды и осадков	Незначительно	Незначительно

Таблица 7

**Общее содержание ПАУ в ОГ исследуемого дизеля, работающего на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла на различных видах топлива**

Номер режима 13-ступенчатого цикла (см. рис. 3)	Концентрация ПАУ в ОГ, мкг/г топлива		
	ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ
1	4,9038	3,3627	1,2853
2	–	–	–
3	1,5973	0,4925	0,2715
4	0,2385	0,0606	0,0487
5	0,3674	0,3526	0,1090
6	1,8642	0,2359	0,2006
7	4,9038	3,3627	1,2853
8	0,8074	0,0601	–
9	0,2219	0,0807	–
10	0,3784	0,2431	0,0136
11	2,2169	1,0157	–
12	3,1651	1,9711	0,2170
13	4,9038	3,3627	1,2853

Примечание: «–» – очень малая концентрация.

новки, измерительной аппаратуры, методики проведения испытаний и измерений приведены в [14]. Результаты измерений общего содержания ПАУ в ОГ исследуемого дизеля, работающего на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла на различных видах топлива, приведены в табл. 7, а интегральное содержание в ОГ индивидуальных ПАУ представлено в табл. 8. По данным табл. 7 следует отметить, что максимальное содержание ПАУ в ОГ наблюдалось на режимах холостого хода (режимы № 1, 7 и 13), отличающихся недостаточной интенсивностью движения воздушного заряда, плохим качеством процессов распыливания топлива и смесеобразования, относительно низкими значениями температуры и давления сгорания. Отмечено, что практическое отсутствие ПАУ в исходном растительном масле приводит к тому, что и в ОГ двигателя, работающего на нем, содержание этих углеводородов незначительно.

С использованием описанной методики и представленных в табл. 8 экспериментальных данных проведена оценка экологической безопасности силовой установки с автотракторным двигателем, работающим на нефтяном дизельном топливе, подсолнечном масле и на смеси этих видов топлива в пропорции 50 : 50. При этом следует отметить, что среди индивидуальных ПАУ, содержащихся в ОГ исследуемого дизеля, ПДК рабочей зоны установлены лишь для нафталина, фенантрена, пирена и бензо(а)пирена. Приведенные к нафталину концентрации указанных индивидуальных ПАУ, определенные по формуле (1), сведены в табл. 9. После суммирования этих приведенных концентраций получена

Таблица 8

**Интегральное содержание индивидуальных ПАУ в ОГ исследуемого дизеля, работающего на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла на различных видах топлива**

ПАУ	Концентрация ПАУ в ОГ, мкг/г топлива		
	ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ
Нафталин C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	0,0751	0,0247	0,0112
Аценафтилен C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	0,0852	0,0644	0,0178
Фенантрен C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	1,4391	1,2811	0,9215
Антрацен C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	0,2462	0,0004	0
Флуорантен C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	4,0489	2,3988	0,8320
Пирен C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	1,4261	0,9799	0,9487
Бензантрацен C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	1,1607	0,0036	0,0002
Бензо(а)пирен C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	0,0757	0,0509	0,0052

суммарная приведенная концентрация ПАУ  $\Sigma \bar{C}_i$  – критерий, характеризующий экологическую безопасность ОГ исследуемого дизельного двигателя, работающего на различных видах топлива (см. табл. 9).

Приведенные в табл. 9 данные свидетельствуют о том, что наибольший суммарный показатель экологической опасности  $\Sigma \bar{C}_i$  отмечен при работе исследуемого дизеля на нефтяном ДТ, а наименьший — при работе на ПМ. В первом случае этот показатель равен 11080,6 мкг/г топлива, а во втором — 1349,1 мкг/г топлива (графически полученные значения суммарной приведенной концентрации ПАУ  $\Sigma \bar{C}_i$  в ОГ исследуемого дизеля представлены на рис. 4а). При этом следует отметить, что наибольшее влияние на суммарный показатель  $\Sigma \bar{C}_i$  оказывает выброс бензо(а)пирена C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>. Поэтому экологическую опасность ОГ двигателя, работающего на том или ином виде топлива, можно оценивать только по выбросу бензо(а)пирена C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>. Приведенные в табл. 9 показатели эко-

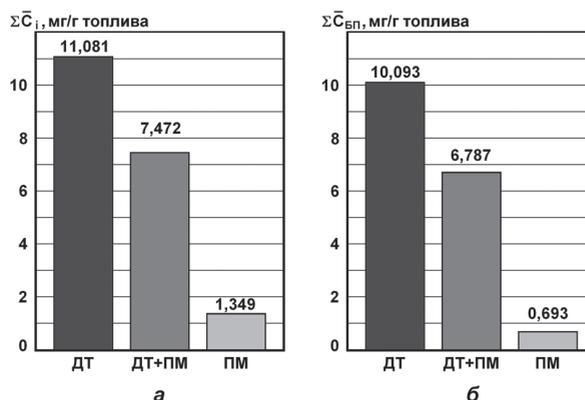


Рис. 4. Суммарная приведенная концентрация ПАУ  $\Sigma \bar{C}_i$  (а) и показатель экологической опасности по бензо(а)пирену  $\Sigma \bar{C}_{БП}$  (б) при работе испытываемого дизеля на дизельном топливе (ДТ), смеси 50% ДТ и 50% ПМ (ДТ+ПМ) и на подсолнечном масле (ПМ) на режимах 13-ступенчатого цикла JA 349

Содержание индивидуальных полициклических ароматических углеводородов в ОГ дизеля, работающего на различных видах топлива, экологические характеристики ПАУ и ОГ исследуемого дизельного двигателя

ПАУ	ПДК рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Отношение ПДК <sub>i</sub> /ПДК <sub>C<sub>10</sub>H<sub>8</sub></sub>	Концентрация ПАУ в ОГ $\bar{C}_i$ , мкг/г топлива			Приведенная концентрация $\bar{C}_i$ , формула (1), мкг/г топлива		
			ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ	ДТ	50 % ДТ + 50 % ПМ	ПМ
Нафталин C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	20,0	1	0,0751	0,0247	0,0112	0,0751	0,0247	0,0112
Аценафтилен C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	—	—	0,0852	0,0644	0,0178	—	—	—
Фенантрен C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	0,8	25	1,4391	1,2811	0,9215	36,0	32,0	23,0
Антрацен C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	—	—	0,2462	0,0004	0	—	—	—
Флуорантен C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	—	—	4,0489	2,3988	0,8320	—	—	—
Пирен C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	0,03	667	1,4261	0,9799	0,9487	951,2	653,6	632,8
Бензантрацен C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	—	—	1,1607	0,0036	0,0002	—	—	—
Бензо(а)пирен C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	0,00015	133333	0,0757	0,0509	0,0052	10093,3	6786,6	693,3
Суммарная приведенная концентрация ПАУ $\Sigma \bar{C}_i$ , мкг/г топлива						11080,6	7472,2	1349,1
Показатель экологической опасности по бензо(а)пирену $\bar{C}_{БП}$ , мкг/г топлива						10093,3	6786,6	693,3

логической опасности по бензо(а)пирену (его приведенные концентрации  $\bar{C}_{БП}$  в ОГ) для исследуемого двигателя также свидетельствует о преимуществах использования биотоплива, получаемого из растительных масел: для нефтяного ДТ этот показатель равен 10093,3 мкг/г топлива, а для ПМ — 693,3 мкг/г топлива (графически полученные значения приведенной концентрации бензо(а)пирена  $\bar{C}_{БП}$  в ОГ исследуемого дизеля представлены на рис. 4б).

Проведенные исследования показали эффективность использования предложенной методики для оценки экологической безопасности силовых установок с автотракторными двигателями, работающими на различных видах топлива (включая биотопливо), учитывающей выбросы ПАУ с ОГ. В исследованиях отмечен меньший выброс ПАУ при работе исследуемого дизеля на биотопливе с использованием подсолнечного масла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Машиностроение. Энциклопедия. Том IV. Двигатели внутреннего сгорания / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др. / Под ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013.
2. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
3. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А.А. Александров, И.А. Архаров, В.А. Марков и др. / Под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012.
4. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов и др. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011.
5. Экологические аспекты применения моторных топлив на транспорте / В.Ф. Кутенев, В.А. Звонов, В.И. Черных и др. // Автомобильные и тракторные двигатели. Межвуз. сб. М.: Изд-во ТУ «МАМИ», 1998. Вып. 14. С. 150–160.
6. Канило П.М., Соловей В.В., Костенко К.В. Проблемы загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными супертоксинами // Вестник ХНАДУ. 2011. Вып. 52. С. 47–53.
7. Лач А. Канцерогенный эффект полициклических ароматических углеводородов. Лондон: Империял Колледж Пресс, 2005.
8. Пурмаль А.П. Антропогенная токсикация планеты // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 9. С. 46–51.
9. Экологическое и токсикологическое воздействие полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) на окружающую среду / Т.Н. Нгандже, Э.А. Абара, К.А. Ибе и др. <http://www.jurnal.org/articles/2009/ecol2.html>.
10. Morishima A., Narushima T., Moriwaki H. et al. Experimental and Numerical Studies on Particulate Matter Formed in Fuel Rich Mixture // SAE Technical Paper Series. — 2003. No 2003-01-3175. P. 1–10.
11. Akasaka Y., Sakurai Y. Effects of Fuel Properties on Exhaust Emission from DI Diesel Engine // Transactions of the JSME. Ser. B. 1997. Vol. 63. No 607. P. 1091–1097.
12. Harrung A., Lies K.-H. Schnellverfahren zur Bestimmung der PAK-Werte // MTZ. 1990. Jg. 51. No 1. S. 12–17.
13. Lepperhoff G., Schommers J. Einfluss des Schmieröls auf die PAN-Emissionen von Verbrennungsmotoren // MTZ. 1986. Jg. 47. No 9. S. 367–371.
14. Ziejewski M., Goettler H.J., Gook L.W. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emissions from Plant Oil Based

- Alternative Fuels // SAE Technical Paper Series. 1991. No 911765. P. 1–8.
15. Narushima T., Morishima A., Moriwaki H. et al. Experimental and Numerical Studies on Soot Formation in Fuel Rich Mixture // SAE Technical Paper Series. 2003. No 2003-01-1850. P. 1–9.
  16. Kitamura T., Ito T., Senda J. et al. Detailed Chemical Kinetic Modeling of Diesel Spray Combustion with Oxygenated Fuels // SAE Technical Paper Series. 2001. No 2001-01-1262. P. 1–19.
  17. Barale R., Bulleri M., Cornetti G. et al. Preliminary Investigation on Genotoxic Potential of Diesel Exhaust // SAE Technical Paper Series. 1992. No 920397. P. 1–15.
  18. Mitchell K., Steere D.E., Taylor J.A. et al. Impact of Diesel Fuel Aromatics on Particulate, PAH and NitroPAH Emissions // SAE Technical Paper Series. 1994. No 942053. P. 1–29.
  19. Bagley S.T., Gratz L.D., Johnson J.H., McDonald J.F. Effects of an Oxidation Catalytic Converter and a Biodiesel Fuel on the Chemical, Mutagenic, and Particle Size Characteristics of Emissions from a Diesel Engine // Environmental Science & Technology. 1998. Vol. 32, No 9. P. 1183–1191.
  20. Krahl J., Vellguth G., Munack A. et al. Exhaust Gas Emissions and Environmental Effects by Use of Rape Seed Oil Based Fuels in Agricultural Tractors // SAE Technical Paper Series. 1996. No 961847. P. 1–14.
  21. McMillian M.H., Cui M., Gautam M. et al. Mutagenic Potential of Particulate Matter from Diesel Engine Operation on Fischer-Tropsch Fuel as a Function of Engine Operating Conditions and Particle Size // SAE Technical Paper Series. 2002. No 2002-01-1699. P. 1–16.
  22. Takada K., Yoshimura F., Ohga Y. et al. Experimental Study on Unregulated Emission Characteristics of Turbocharged DI Diesel Engine with Common Rail Fuel Injection System // SAE Technical Paper Series. — 2003. — No 2003-01-3158. — P. 1–8.
  23. Sakai T., Kashiwakura K. Basic Investigation of Particulate Matter (O-PM) and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted by Two-stroke Motorcycles // SAE Technical Paper Series. 2002. No 2002-32-1846. P. 1–4.
  24. Takada K., Ikezawa H., Kotani Y. Determination of Polyaromatic Hydrocarbons in Particulate Matter with HPLC and 3D-Detector // SAE Technical Paper Series. 2001. No 2001-01-3318. P. 1–6.
  25. Ahrenfeldt J., Henriksen U., Schramm J. et al. Combustion Chamber Deposits and PAH Formation in SI Engines Fueled by Producer Gas from Biomass Gasification // SAE Technical Paper Series. 2003. No 2003-01-1770. P. 1–8.
  26. Ball J.C., Hilder D.L., Wolf L.R. et al. Emissions of Toxicologically Relevant Compounds Using Dibutyl Maleate and Tripropylene Glycol Monomethyl Ether Diesel Fuel Additives to Lower NOx Emissions // SAE Technical Paper Series. 2005. No 2005-01-0475. P. 1–35.
  27. Abbass M.K., Andrews G.E., Williams P.T. Diesel particulate composition changes along an air cooled exhaust pipe and dilution tunnel // SAE Technical Paper Series. 1989. No 890789. P. 1–8.
  28. Abbass M.K., Andrews G.E., Ishaq R.B. A comparison of the particulate's composition between turbocharged and naturally aspired DI Diesel engines // SAE Technical Paper Series. 1991. No 910733. P. 1–9.
  29. Israel G.W., Zierock K.H., Mollerauer K. Grossenverteilung und chemische Zusammensetzung der Partikelemissionen verschiedener Dieselmotoren // VDI Berichte. 1982. No 429. S. 279–286.
  30. Lopez B., Masclat P., Person A. Emissions Diesel. Analyse des polluants non reglementes // Colloque «pollution de l'air par les transports» Edition INRETS. 1987. P. 77–85.
  31. Mills G.A., Howarth J.S. The effect of Diesel fuel aromaticity on polynuclear aromatic hydrocarbons exhaust emissions // Journal of the Institute of Energy. 1984. P. 273–286.
  32. Wajzman J., Champoussin J.C., Hayyani M. Mesure en gaz bruts des hydrocarbures aromatiques polycycliques emis par le moteur Diesel // Entropie. 1995. An. 31. No 191. P. 15–19.
  33. Williams P.T., Andrews G.E. The influence of lubricating oil on Diesel particulate PAH emissions // SAE Technical Paper Series. 1989. No 890825. P. 1–7.
  34. Wajzman J., Champoussin J.C., Dessalces G. et al. Measurement Procedures of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Undiluted Diesel Exhaust Gases // SAE Technical Paper Series. 1996. No 960248. P. 79–87.
  35. Азарова Ю.В., Кузнецова Н.Я. Новое об относительной агрессивности углеводородов // Автомобильная промышленность. 1999. No 3. С. 14–16.

## Assessment of Ecological Safety of Power Plants with Diesel Engines

**V.A. Markov**, Doctor of Engineering, Professor, Bauman Moscow State Technical University

**S.N. Devyanin**, Head of Chair, Doctor of Engineering, Professor, Moscow State Agro-Engineering University named after V.P. Goryachkin

**V.V. Markova**, Lecturer, Ph.D. of Engineering, Bauman Moscow State Technical University

*Toxicological properties of diesel engines' exhaust gases, in particular polycyclic aromatic hydrocarbons, as well as diesel engines' exhaust gases composition, toxicity assessment technique for exhaust gases of diesel engines working at different types of fuel have been presented. Advantages related to use in diesels a biological fuel made on basis of vegetable oils have been shown.*

**Keywords:** diesel engine, diesel fuel, sunflower oil, exhaust gases toxicity.