

**В.В. Руднев, М.Л. Хасанова,
В.А. Белевитин**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
КРУПНЫХ ГОРОДОВ**



**Челябинск
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический
университет»

В.В. Руднев, М.Л. Хасанова, В.А. Белевитин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
КРУПНЫХ ГОРОДОВ**

**Челябинск
2017**

УДК 577.4
ББК 28.081.4
Р83

Руднев, В.В. Моделирование ресурсов повышения экологической безопасности крупных городов [Текст]: монография / В.В. Руднев, М.Л. Хасанова, В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Юж.-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 88 с.: ил.

ISBN 978-5-906908-38-4

В монографии приведен анализ проблемы загрязнения окружающей среды в городах-мегаполисах. Рассмотрен двигатель внутреннего сгорания как значительный источник вредного воздействия на окружающую среду наряду с загрязняющим влиянием промышленных предприятий. Приводится подборка материалов исследования повышения экологических и экономических показателей двигателей городского транспорта. Предложены способы снижения вредного воздействия транспортных двигателей на окружающую среду.

Монография будет полезна научным работникам, аспирантам, магистрантам и студентам, обучающимся по направлению «Транспорт». Материалы монографии открывают новые подходы к решению наиболее значимых задач в сфере охраны окружающей среды и смежных областях.

Рецензенты: В.В. Викторов, д-р хим. наук, профессор
К.Н. Семендяев, канд. техн. наук, доцент

ISBN 978-5-906908-38-4

© Руднев В.В., Хасанова М.Л., Белевитин В.А., 2017
© Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЩЕСТВА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	7
1.1. Структура окружающей среды	7
1.2. Промышленные предприятия городов-мегаполисов как источник экологической опасности	10
1.2.1. Загрязняющие примеси в атмосфере, их источники и концентрации.....	10
1.2.2. Качественный и количественный состав загрязнителей атмосферы российских городов.....	14
1.2.3. Физико-химические изменения загрязняющих примесей в атмосфере и их последствия.....	17
1.3. Поршневые двигатели внутреннего сгорания как источник экологической опасности.....	20
1.3.1. Состав отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	22
1.3.2. Влияние отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания на состояние окружающей среды.....	22
1.3.3. Расходование атмосферного кислорода.....	25
1.3.4. Нормирование вредного воздействия на окружающую среду отработавших газов двигателей внутреннего сгорания.....	26
1.4. Пути снижения вредного воздействия отработавших газов на окружающую среду.....	27
1.4.1. Совершенствование конструкции двигателя и его систем.....	27
1.4.2. Обезвреживание отработавших газов с помощью специальных устройств.....	29
1.4.3. Использование нетрадиционных топлив и применение присадок.....	31
1.4.4. Поддержание технического состояния двигателя и его малотоксичные регулировки.....	32
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВС.....	33
Глава 3. СНИЖЕНИЕ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВС НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ.....	51
3.1. Структура энергии потока отработавших газов поршневого ДВС с каталитическим нейтрализатором и механизм её передачи к рабочему телу утилизационной установки.....	51
3.2. Система показателей для оценки энергии потока отработавших газов дизеля и процесса ее передачи к рабочему телу утилизационной установки.....	57
3.3. Затраты энергии для обеспечения подачи атмосферного воздуха в каталитический нейтрализатор.....	58
Глава 4. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВС ЗА СЧЕТ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА.....	63
4.1. Теоретическое обоснование целесообразности повышения эффективности очистки отработавших газов от вредных веществ в каталитическом нейтрализаторе.....	63

4.2. Структура энергии потока отработавших газов поршневого двигателя с тепловым аккумулятором и механизм ее передачи каталитическому нейтрализатору.....	64
4.3. Физическое моделирование процесса стабилизации температуры отработавших газов.....	66
4.4. Математическое моделирование процесса стабилизации температуры в тепловом аккумуляторе с фазовым переходом.....	71
4.4.1. Тепловое состояние теплового аккумулятора при заряде.....	71
4.4.2. Тепловое состояние теплового аккумулятора при разряде.....	74
4.5. Обстоятельства уменьшения негативного влияния загрязнения атмосферы крупных городов.....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	79

ВВЕДЕНИЕ

Во все времена человек стремился к улучшению качества жизни, что побуждало его использовать все новые и новые технологии. Двадцатый век стал отправной точкой для мощного подъема развития и роста промышленного производства. Возникновение огромных мегаполисов, которые быстрыми темпами росли и развивались, не могло не вселять всеобщую радость и гордость за достижение человеческой мысли.

Стремительные темпы развития человеческого общества, науки и техники, поразительные достижения во всех областях человеческой деятельности, в первую очередь в информатике и коммуникациях, транспорте и связи, изменили наши представления о времени и пространстве и привели к переоценке ценностей. Разве кто-нибудь мог предположить, чем обернется для человечества то, что до недавнего времени называлось прогрессом. В процессе реализации многих технических решений получаемые результаты расходятся с ожидаемыми прогнозами. Объем материальных потерь, появление патологий, снижающих дееспособность человека вследствие антропогенных изменений в биосфере мегаполисов, принимают огромные масштабы, и стратегия экстенсивного роста уже не удовлетворяет экологически ориентированное общественное сознание их жителей, теряющих самое ценное – здоровье! Многие отрасли энергетики, промышленности и транспорта образуют не только максимальное количество вредных выбросов, но и создают экологически неблагоприятные условия для проживания жителей как крупных, так и среднего размера городов. Выбросы токсичных веществ в атмосферу городов приводят, как правило, к превышению текущих концентраций веществ над предельно допустимыми их значениями.

Наибольшими загрязнителями воздушного бассейна в современных условиях являются Сибирский и Уральский федеральные округа. Только по стационарным источникам, без учета автомобильного транспорта, на них приходится около 54 % общего объема токсичных выбросов. Вместе с тем, без автомобиля в настоящее время немыслимо существование человечества. При интенсивной урбанизации и росте мегаполисов автомобильный транспорт стал самым неблагоприятным экологическим фактором в охране здоровья человека и природной среды в городе. Таким образом, автомобиль становится конкурентом человека за жизненное пространство.

Природа – целостная система с множеством сбалансированных связей. Нарушение этих связей приводит к изменению установившихся в природе круговорота веществ и энергии. Современным обществом в производство и потребление вовлекается такое количество вещества и энергии, которое в сотни раз превосходит биологические потребности человека, что и является основной причиной современного экологического кризиса (высокий уровень и быстрое нарастание антропогенной нагрузки на окружающую природную среду).

Загрязнение воздуха оказывает вредное воздействие на человека и окружающую среду. По степени загрязнения почвенного покрова г. Челябинска всеми ингредиентами лишь 20 % в удов-

летворительном состоянии. Материальный ущерб, вызываемый загрязнением воздуха, трудно оценить, однако даже по неполным данным он достаточно велик.

За последние десятилетия человечество окончательно убедилось, что основными виновниками загрязнения атмосферного воздуха – одного из основных источников жизни на нашей Планете – являются порождения научно-технического прогресса – автомобиль и промышленные предприятия, прежде всего горно-металлургического профиля. Автомобиль, поглощая столь необходимый для протекания жизни кислород, вместе с тем интенсивно загрязняет воздушную среду токсичными компонентами, наносящими ощутимый вред всему живому и неживому. Вклад в загрязнение окружающей среды, в основном атмосферы, составляет от 60 % до 90 %, тогда как остальная часть вклада приходится преимущественно на промышленные предприятия горно-металлургического профиля.

Некоторые компоненты вредных выбросов автомобильного транспорта и промышленных предприятий участвуют в процессах физического, химического и фотохимического взаимодействия с компонентами воздушной среды, результатом которых является возникновение новых вредных веществ (вторичные атмосферные загрязнители), что еще больше усугубляет ситуацию с вредным воздействием на окружающую среду. Превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ даже в 2–3 раза уже приводит к изменению состояния здоровья людей по некоторым показателям, в 4–7 раз вызывает выраженные функциональные сдвиги, а в 8–10 раз способствует росту специфической и неспецифической заболеваемости. Ситуация с содержанием загрязнений почвенного покрова г. Челябинска отдельными ингредиентами оценивается как экологическое бедствие: содержание в почве цинка превышает ПДК в 15–25 раз, свинца в 12–78 раз.

В настоящее время уменьшение загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами, выделяемыми промышленными предприятиями и автомобильным транспортом, развитие новой формы взаимодействия общества и природы (обеспечение экологической безопасности личности, населения, территории) является одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЩЕСТВА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В течение тысячелетий человек стремился преобразовать мир вокруг себя, осваивал природу, использовал ее ресурсы, только в наши дни к человеческой цивилизации пришло осознание того, что многие ее действия стали источниками экологических опасностей, причем на глобальном уровне. Сегодня каждый человек находится под угрозой экологической катастрофы, которая может принести вместе с собой целый ряд негативных последствий, разрушить многие достижения человека и возможно прекратить его обычное земное существование. Для недопущения преобразования потенциальных опасностей в реальные, необходимо всесторонне изучать их источники, оценить степень отрицательного влияния, разработать меры по его ослаблению и гармонизации экологических отношений и приступить к их реализации.

Основными источниками экологической опасности загрязнения прежде всего воздуха, воды, почвы являются промышленные предприятия и автомобильный транспорт [1].

1.1. Структура окружающей среды

Для обеспечения экологической безопасности личности, населения, территории, как одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, необходимо четкое определение понятия «окружающая (жизненная) среда», её системной организации и структуры.

Определение понятия «окружающая среда» по разному трактуется в ГОСТ Р ИСО 14001-2007 «Национальный стандарт РФ системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению», в основном природоохранительном законе РФ «Об охране окружающей среды», а также в печатных изданиях С.В. Аборина, Е.М. Бажова, Б.А. Сушко, В.Н. Луканина и др. [1–3].

Для корректного определения понятия «окружающая среда», интегративного по своей сути, первоначально необходимо [3]:

- 1) однозначно выделить объект, по отношению к которому рассматривается окружающая среда;
- 2) определить, к какому уровню организации объекта рассматривается окружающая среда;
- 3) выделить элементы, составляющие окружающую среду.

Поскольку проблемы, связанные с ухудшением состояния окружающей среды, обусловлены в основном человеческой деятельностью, чаще всего понятие окружающей среды связывают с человеком. Понятие окружающая среда должно охватывать все уровни организации объекта оценки, т.е. не только сам объект как таковой, но нижние уровни организации, для которых объект оценки является системой, а также верхние уровни организации, для которых объект оценки является элементом. Такой подход полностью соответствует базовым принципам экологии как науки: системной организации материального мира, физико-химического единства живого вещества и внутреннего динамического равновесия. Таким образом, окружающая среда представляет собой многофакторную систему, состоящую как из природных, так и антропогенных компонентов, созданных при активном участии человека и существующих лишь благодаря вещественному, энергетическому и информационному обеспечению человеком, поскольку они являются плодом его интеллектуальных усилий, его способности к абстрактному мышлению [3].

Структура окружающей среды условно может быть разделена на природные (механические, физические, химические и биологические) и социальные элементы среды (труд, быт, социально-экономический уклад, информация). Условность такого деления объясняется тем, что природные факторы действуют на человека в определенных социальных условиях и нередко существенно изменены в результате производственной и хозяйственной деятельности людей. Ее основными подсистемами являются естественная среда обитания человека и искусственная среда обитания.

Естественная среда – это часть природы, с которой общество взаимодействует в процессе своего развития и жизнедеятельности. В начале возникновения человечества естественная среда его обитания охватывала лишь небольшую часть земной поверхности. Теперь же она включает не только всю поверхность земли, но и ее недра, Мировой океан, околоземное воздушное пространство, а также часть нашей Солнечной системы. По мере развития техники и науки естественная среда обитания человека будет расширяться.

Искусственная среда – это такая часть окружающей среды, которая создана человеком в процессе исторического развития материального производства, является продуктом его жизнедеятельности и не существует сама по себе как природа. Что же входит в состав искусственной среды? Вся совокупность созданных человеком жилищ, городов, населенных пунктов, дорог, транспортных средств, орудий труда, технических приспособлений и устройств, не существующих в природе искусственных материалов, заводов и т.д.

Таким образом, развитие общества протекает в сложных материальных условиях, включающих как естественную, так и искусственную среду обитания. В разные исторические эпохи роль и соотношение этих двух подсистем окружающей среды были разными и по-разному влияли на жизнедеятельность человека. Сам человек также по-разному влиял на окружающую среду, видоизменял ее, и в настоящее время значительная часть его жизнедеятельности протекает в искусственной среде, которая сама представляет собой продукт преобразования и видоизменения среды естественной.

В качестве основных природных элементов (компонентов) окружающей среды выделяются: атмосфера, гидросфера, литосфера, педосфера (почвы), эргосфера и биосфера. Содержание понятий перечисленных природных компонентов окружающей среды довольно однозначно воспринимается специалистами в области охраны окружающей среды и научным сообществом. Рассматривая взаимодействие природы и общества, человека и окружающей среды, нередко приходится пользоваться и особыми понятиями: «геосфера», «биосфера», «ноосфера» и «техносфера». Использование этих понятий может помочь более широкому и глубокому анализу взаимодействия человека с окружающей средой.

Естественная среда, в которой живет и развивается человечество, охватывает часть геосферы, биосферу и очень сложна по своей структуре, является одним из важнейших материальных условий жизнедеятельности человечества. В результате преобразования человеком естественной среды обитания можно говорить уже о реальном существовании нового ее состояния – о техносфере. Понятие «техносфера» выражает совокупность технических устройств и систем вместе с областью технической деятельности человека. Ее структура достаточно сложна, так как включает в себя техногенное вещество, технические системы, живое вещество, верхнюю часть земной коры, атмосферу, гидросферу. С началом эры космических полетов техносфера вышла далеко за пределы биосферы и охватывает уже околоземный космос.

Между преимущественно природными и преимущественно естественными условиями жизни человека расположена целая система смешанных форм, сочетающих в себя естественное и искусственное в большей или меньшей мере в зависимости от места обитания и сферы деятельности человека. С учетом того, что со временем произошла концентрация людей в городских поселениях и возникли городские агломерации, в том числе мегаполисы, зависимость от места (среды) обитания и сферы деятельности человека не только не снизилась, а еще более возросла.

В жизненном цикле человек и окружающая среда обитания непрерывно взаимодействуют и образуют постоянно действующую систему «человек – среда обитания», в которой человек реализует свои физиологические и социальные потребности. Взаимодействие человека со средой обитания может быть позитивным (при комфортном и допустимом состоянии) и негативным (при опасном и чрезвычайно опасном). Многие факторы, постоянно оказывающие воздействие на человека, являются неблагоприятными для его здоровья и активной деятельности. Классификация условий для человека в системе «человек – среда обитания» включает [7]:

– *Комфортные* (оптимальные) условия деятельности и отдыха. К данным условиям человек приспособлен в большей степени. Проявляется наивысшая работоспособность, гарантируются сохранение здоровья и целостность компонентов среды обитания.

– *Допустимые*. Характеризуются отклонением уровней потоков веществ, энергии и информации от номинальных значений в допустимых пределах. Данные условиях труда не оказывают негативное воздействие на здоровье, но приводят к дискомфорту и снижению работоспособности и продуктивности деятельности. Допустимые нормы воздействия закреплены в санитарных нормах.

– *Опасные*. Потоки веществ, энергии и информации превышают допустимые уровни воздействия. Оказывают негативное воздействие на здоровье человека, вызывают заболевания и приводят к деградации природной среды.

– *Чрезвычайно опасные*. Потоки за короткий срок могут нанести травму или привести к смерти, вызывая необратимые разрушения в природной среде.

Решение проблемы безопасности жизнедеятельности человека состоит в обеспечении комфортных условий их деятельности, жизни, защите человека и окружающей его среды от воздействия вредных факторов. За любой вред человек расплачивается своим здоровьем и жизнью, которые можно рассматривать как системообразующие факторы в системе «человек – среда обитания», конечный результат ее функционирования и критерий качества окружающей среды. Одним из важных направлений в обеспечении комфортных условий жизнедеятельности людей является защита среды обитания от воздействия вредных факторов. В первую очередь это касается загрязняющих факторов воздушной среды, особенно в промышленных центрах, городах-мегаполисах. Ученые обоснованно считают, что ежегодно тысячи смертей в городах всего мира связаны с загрязнением воздуха. Загрязнением атмосферы обусловлено до 30 % общих заболеваний населения промышленных центров.

Над крупными городами-мегаполисами атмосфера содержит в 10 раз больше аэрозолей и в 25 раз больше газов, среди которых наиболее широко распространены окись углерода, диоксид серы и окислы азота. При большом содержании в воздухе газов и пыли (сажи) и застоя воздуха над промышленными районами городов-мегаполисов образуются смоги. Особенно опасен смог в случае загрязнения воздуха сернистым газом. Он поражает органы дыхания человека и уменьшает их сопротивляемость действию других вредных примесей в воздухе (дыма, грунтовой, асфальтовой и асбестовой пыли). При этом 60–70 % газового загрязнения дает автомобильный транспорт. Автомобиль стал одним из главных виновников загрязнения городской среды. В год от каждой машины от истирания шин поступает в воздух до 10 кг резиновой пыли. Много ядовитых веществ выбрасывается из выхлопной трубы, двигателем автомобиля поглощается кислород и выделяется углекислый и угарный газы. Содержание свинца в выбросах из выхлопных труб машин может вызвать мозговые расстройства и умственную отсталость у детей.

Атмосфера – газовая оболочка Земли, состоящая из азота (78,08 %), кислорода (20,95 %), аргона (0,93 %), двуокиси углерода (0,3 %). Атмосфера обеспечивает возможность жизни на Земле, оказывает большое влияние на разные стороны жизни человечества. На высоте 20–25 км располагается озоновый слой, который предохраняет все живое от губительного воздействия коротковолнового излучения. Антропогенное воздействие, в основном, распространяется на нижние слои атмосферы, достигая высоты нескольких десятков километров. Состав атмосферы в зонах антропогенного воздействия значительно изменяется за счёт выбросов загрязняющих веществ, перечень которых составляет несколько сотен. Неоднородность состава атмосферы в приземном слое в значительной мере определяется антропогенным воздействием и её состав зависит от совокупных выбросов загрязняющих веществ.

Антропогенное воздействие на окружающую среду многообразно и затрагивает прямо или опосредованно все компоненты окружающей среды. Техногенная деятельность городов и связанные с ней видоизменения среды обитания человечества повлекли за собой необходимость более пристального изучения экологической проблемы.

1.2. Промышленные предприятия городов-мегаполисов как источник экологической опасности

В начале XX века в промышленности применялись 19 химических элементов, в середине века промышленное производство стало использовать около 50 элементов, а в 70-х годах – практически все элементы таблицы Д.И. Менделеева. Это существенно сказалось на составе промышленных выбросов и привело к качественно новому загрязнению атмосферы, в частности аэрозолями тяжелых и редких металлов; синтетическими соединениями, не существующими и не образующимися в природе; радиоактивными, канцерогенными, бактериологическими и другими веществами. Особенно острой проблема загрязнения атмосферы стала во второй половине XX века, период научно-технической революции, характеризующийся чрезвычайно высокими темпами роста: промышленного производства, выработки и потребления электроэнергии, выпуска и использования в большом количестве транспортных средств. В России основное загрязнение атмосферы создают ряд отраслей промышленности, автотранспорт и теплоэнергетика. Их участие в загрязнении атмосферы составляет (%): черная и цветная металлургия, нефтедобыча и нефтехимия, предприятия стройматериалов, химическая промышленность – 30; автотранспорт – 40; теплоэнергетика – 30 [12].

1.2.1. Загрязняющие примеси в атмосфере, их источники и концентрации

Основные загрязняющие атмосферу токсичные примеси, их источники и концентрации приведены в таблице 1.1, из которой следует, что наиболее распространенные токсичные вещества, загрязняющие атмосферу, – оксид углерода CO, диоксид серы SO₂, оксиды азота NO_x, углеводороды C_nH_m, пыль. Примерный относительный состав вредных веществ в атмосфере крупных городов (%): CO – 45, SO_x – 18, C_nH_m – 15, пыль – 12, NO_x – 10. Превышение концентраций токсичных веществ в загрязненном атмосферном воздухе мегаполисов над фоновым в среднем составляет: по CO – 80 – 1250 и более раз; по SO₂ – 50–300 раз; по NO₂ – до 25 раз; по озону – до 7 раз.

Кроме CO, SO_x, NO_x, C_nH_m и пыли в атмосферу выбрасываются и другие более токсичные вещества (рис. 1.1). Так, вентиляционные выбросы заводов электронной промышленности содержат пары плавиковой, серной, хромовой и других минеральных кислот, органические растворители и т.п. В настоящее время насчитывается более 500 вредных веществ, загрязняющих атмосферу, их количество все увеличивается, что требует действенных мер по очистке атмосферного воздуха.

В атмосферу Земли ежегодно поступает 150 млн т. различных аэрозолей; 220 млн т. диоксида серы; 450 млн т. оксида углерода; 75 млн т оксидов азота. В год на каждого жителя Земли приходится в среднем 300 кг выбросов в атмосферу. Количество наиболее распространенных видов вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу от стационарных источников по ряду городов России, приведено в табл. 1.2.

Наличие металлургических гигантов черной и цветной металлургии в крупных городах Новокузнецк, Магнитогорск, Челябинск, Красноярск обуславливает значительное количество выбросов вредных веществ, особенно оксида углерода и диоксида серы. В тоже время загруженность автомобильным транспортом приводит к росту загрязняющих выбросов оксидов азота.

Степень загрязнения воздуха промышленностью зависит не только от специфики предприятий и их мощности, но и от уровня урбанизированности населенного пункта [7]. В среднем уровень урбанизации в России составляет 75 %. Это очень высокий показатель. В наибольшей степени в нашей стране урбанизированы Центральный, Центрально-Чернозёмный, Северо-Кавказский и Уральский федеральные округа (рис. 1.2). Среди регионов безусловными лидерами по показателю урбанизированности являются Московская, Тульская, Ярославская, Воронежская и Ленинградская области.

Примеси в атмосфере, их источники и концентрация [6]

Примеси	Основные источники примесей		Среднегодовая концентрация в воздухе, мг/м ³
	естественные	антропогенные	
Твердые частицы (зола, пыль и др.)	Вулканические извержения, пылевые бури, лесные пожары и др.	Сжигание топлива в промышленных и бытовых установках	В городах 0,04–0,4
SO ₂	Вулканические извержения, окисленные сера и сульфаты, рассеянные в море	Тоже	В городах до 1,0
NO _x	Лесные пожары	Промышленность, автотранспорт, теплоэлектростанции	В районах с развитой промышленностью до 0,2
CO	Лесные пожары, выделения океанов, природные углеводороды	Автотранспорт, промышленные энергоустановки, черная металлургия, парфюмерия, производство лекарств	В городах от 1 до 50
Летучие углеводороды	Лесные пожары, природный метан, природные терпены	Автотранспорт, дожигание отходов, испарение нефтепродуктов	В районах с развитой промышленностью до 3,0
Полициклические, ароматические углеводороды		Автотранспорт, химические заводы, нефтеперерабатывающие заводы	В районах с развитой промышленностью до 0,01

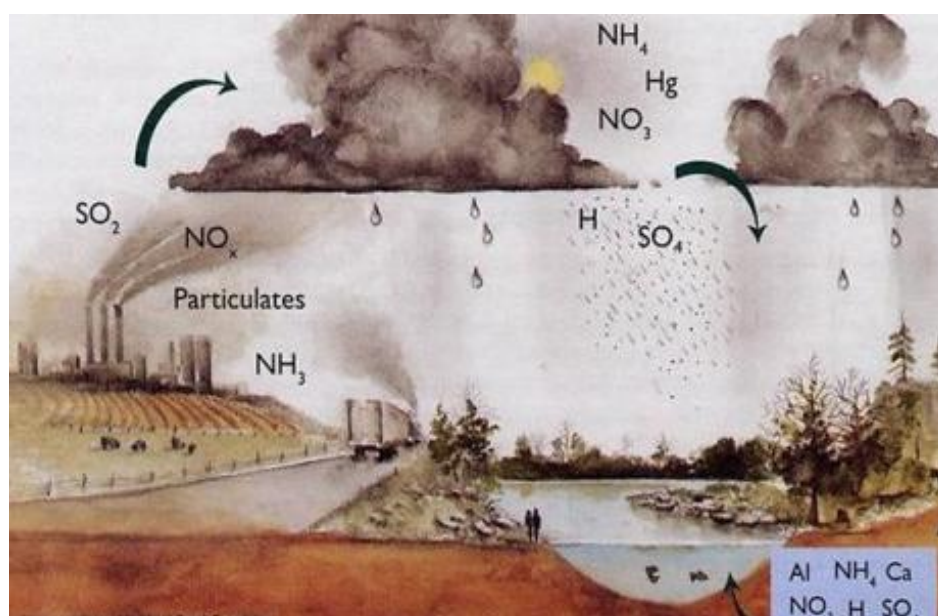


Рис. 1.1. Обобщенная схема загрязнений мегаполисов [7]

Наибольшие валовые выбросы загрязняющих веществ с промышленных предприятий приходится на Уральский и Сибирский федеральный округа. Их «вклад» в загрязнение атмосферы России составляет 58 % от совокупного объема эмиссии вредных веществ.

**Выбросы вредных веществ в атмосферный воздух от стационарных источников
в ряде городов России, тыс. т/год [6]**

Город	Вредные вещества					
	Всего	Твердые	Газообразные и жидкие	Из них		
				SO _x	NO _x	CO
Архангельск	85	20	65	45	5	13
Братск	158	41	117	21	6	85
Волгоград	228	42	186	38	19	60
Иркутск	94	29	65	29	8	26
Кемерово	122	37	85	26	28	21
Красноярск	259	78	181	39	13	115
Магнитогорск	849	170	679	84	34	548
Москва	312	30	282	70	99	28
Новокузнецк	833	136	697	90	34	562
Санкт-Петербург	236	46	190	74	47	41
Усть-Каменогорск	143	24	119	69	12	36
Уфа	304	9	295	72	25	36
Челябинск	427	94	333	60	29	210

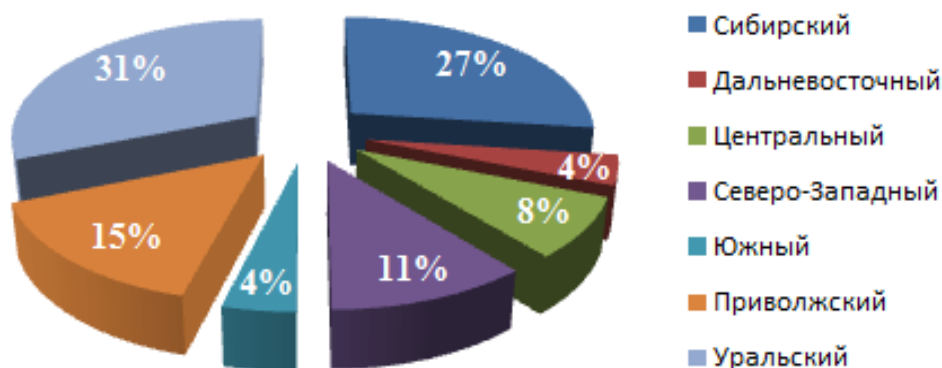


Рис. 1.2. Распределение промышленных выбросов в атмосферу по федеральным округам [8]

В Уральском федеральном округе 12 крупнейших в РФ источников промышленного загрязнения воздуха, из них семь в Свердловской области:

1. «Нижнетагильский металлургический комбинат» (г. Нижний Тагил);
2. «Качканарский ГОК «Ванадий»» (г. Качканар);
3. «Высокогорский ГОК» (г. Нижний Тагил);
4. «Уральский асбестовый горно-обогатительный комбинат» (г. Асбест);
5. «Уралхимпласт» (г. Нижний Тагил);
6. «Святогор» (г. Красноуральск);
7. «Богословский алюминиевый завод» (г. Краснотуринск)

и пять в Челябинской области:

1. «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск);

2. Филиал ОАО ОГК-2 «Троицкая ГРЭС» (г. Троицк);
3. «Карабашмедь» (г. Карабаш);
4. МУП «ПОВВ» (г. Челябинск);
5. ФГУП ПО «Маяк» (г. Озёрск).

В Красноярском крае Сибирского федерального округа 5 крупнейших в РФ источников промышленного загрязнения воздуха:

1. Заполярный филиал ГМК «Норильский никель» (г. Норильск);
2. «РУСАЛ-Красноярск» / «Красноярский алюминиевый завод» (г. Красноярск);
3. «РУСАЛ-Ачинск» / «Ачинский глиноземный комбинат» (г. Ачинск);
4. «Краском» (г. Красноярск);
5. «Золотодобывающая компания “Полюс”» (Основные предприятия компании расположены в Красноярском крае, Иркутской и Магаданской областях, а также в Республике Саха (Якутия)).

Сильнее всего атмосферу российских городов отравляют электроэнергетика, цветная и чёрная металлургия, нефтедобыча и нефтепереработка, угольная, газовая промышленность, а также машиностроение (рис. 1.3).

70 % электроэнергии в нашей стране вырабатывается на ТЭС, работающих на твёрдом топливе – угле. При сжигании угля воздух загрязняется сернистым и серным ангидридами, фторидами, токсичными примесями мышьяка, диоксида кремния и т.д.



Рис. 1.3. Доля отраслей промышленности в загрязнении воздуха российских городов [8]

Вырабатывая 1 т передельного чугуна, заводы чёрной металлургии выбрасывают в атмосферу 4,5 кг пыли, 2,7 кг сернистого газа, 0,6 кг марганца. Из труб агломерационных фабрик выходит едкий дым, содержащий продукты выгорания серы и железных руд. При выработке 1 т руды испаряется 190 кг серы. При получении 1 т алюминия предприятиями цветной металлургии расходуется от 38 до 47 кг фтора, и около 65 % его выделяется в атмосферу.

Проблему промышленного загрязнения воздуха в целом в городах РФ, где имеются предприятия топливно-энергетического комплекса, алюминиевой промышленности, чёрной металлургии, химии и нефтехимии, добычи и транспортировки нефтепродуктов, создают повышенные концентрации бензопирена, взвешенных частиц, диоксида азота, сероуглерода и формальдегида. Радиус

загрязнения атмосферы промышленными предприятиями в России варьируется от 2 до 30 км. Многое здесь зависит от высоты газоотводной трубы завода. Чем выше труба, тем мягче последствия загрязнения для жителей города, но тем больше территория, на которую рассеиваются выбрасываемые загрязнения. К примеру, от свинцового загрязнения, распространяемого Среднеуральским медеплавильным заводом в городе Ревде (Свердловская область), благодаря высокой трубе страдает соседний Первоуральск.

1.2.2. Качественный и количественный состав загрязнителей атмосферы российских городов

Под качественным составом выбросов подразумевается перечень всех загрязняющих веществ, выбрасываемых предприятием. В справочнике загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу, то там можно найти свыше 2 000 самых разнообразных загрязняющих веществ: газов, аэрозолей, пылей и т.д. [9]. Каждое из этих веществ оказывает свое воздействие на организм человека. Зная только качественный состав выбросов предприятия, можно приближенно оценить опасность промышленного объекта.

Вещества-загрязнители имеют несколько классификаций по токсичности (ядовитости). По этому признаку различают четыре класса веществ-загрязнителей:

I класс – чрезвычайно опасные – к этому классу относят ртуть, ее соединения, гексахлоран, бензапирен, диоксины, соединения серебра и хрома. При воздействии этих веществ на организм человека нарушается нервная деятельность, возникают раковые и другие заболевания, возможен летальный (смертельный) исход.

II класс – высокотоксичные загрязнители. К ним относят сероводород, бензол, оксиды азота, кислородные соединения хлора, соединения меди и никеля. Это сильные яды, которые провоцируют раковые заболевания, вызывают общие отравления, экзему, нервный паралич и т.д.

III класс – умеренно опасные: уксусная кислота, этанол, фенол, диоксид свинца, уксусный и муравьиный альдегид. При их воздействии нарушается работа отдельных органов людей; особенно опасны в больших количествах.

IV класс – малоопасные. К ним относят аммиак, угарный и углекислый газы, хлориды цинка, алюминия, марганца и др. В больших количествах вызывают отравление организма.

Чем опаснее в составе выбросов предприятия вещество, тем ниже класс опасности промышленного предприятия (от 1 до 4). К примеру, вещество с кодом 337 (оксид углерода СО) относится к 4-му классу опасности и его воздействие на организм человека (при прочих равных условиях) значительно ниже, чем, например, воздействие вещества с кодом 703 (бензапирен, 1-й класс опасности).

Предельно допустимая концентрация (ПДК) – концентрация загрязняющего вещества, при которой в течение определенного времени (20 мин., 8 ч. и т.д.) на человека не оказывается никакого негативного влияния. Более опасны вещества с наименьшими значениями ПДК. Соответственно, чем ниже ПДК у вещества, тем ниже класс опасности промышленного предприятия.

Из многочисленных загрязнителей атмосферы основными являются аэрозоли – твердые или жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в газообразной среде. Частицы, взвешенные в воздухе, называются атмосферными аэрозолями. Аэрозоли разделяют на первичные, поступающие непосредственно в атмосферу, и вторичные, являющиеся результатом их превращения. Аэрозоли делятся на три группы: пыли – состоящие из твердых частиц, дымы и аэрозоли, которые получаются при конденсации газа, туманы. В атмосфере аэрозольные загрязнения воспринимаются в виде дыма, тумана, мглы и дымки. Аэрозоль с жидкими частицами – туман, с твердыми частицами – дым. Около 60 % общего количества аэрозолей, попадающих в атмосферу, составляют такие твердые частицы, как пыль, зола, сажа. В промышленных аэрозолях наибольшая доля частиц приходится на продукты сжигания: это сажа – 48–27 %, зола – 51–62 %, смола – около 1 %.

Пыль в атмосфере – совокупность взвешенных в воздухе мелких твердых частиц, способных оседать при безветрии. Химический состав частиц пыли различный [33; 86].

Зола – остаток после выгорания органической части топлива. Главными компонентами золы являются оксид кремния и оксид алюминия, также в ней содержится кобальт, никель, молибден, ванадий, хром и золото.

Сажа представляет собой высокодисперсный нетоксичный порошок, на 90–95 % состоящий из частичек углерода.

В зависимости от дисперсности аэрозоля (размера частиц) разделяют следующие виды аэрозолей – пыль, облака, дымы [10; 11]:

- пыль (размер частиц дисперсной фазы более 10 мкм (10^{-5} м)),
- облака, туманы (10–0,1 мкм (10^{-7} – 10^{-5} м)),
- дымы (0,1–0,001 мкм (10^{-9} – 10^{-7} м)).

Структура аэрозоля, т.е. форма его частиц, зависит от природы и механизма образования. Частицы аэрозолей могут иметь самую разную форму, в зависимости от которой их классифицируют на три основных класса (рис. 1.4) [33; 86]:

– Изометрические (частицы с приблизительно одинаковыми размерами в трех направлениях). К этому классу относятся сферы, правильные многогранники или частицы близкие к ним по форме. Большинство научных представлений о поведении аэрозолей относится к изометрическим частицам (оптика аэрозолей, движение двухфазных сред и т.д.);

– Пластинки (с одним размером, гораздо меньшим, чем два других). К этому классу относятся лепестки, пленки, мембраны, чешуйки, диски. Форму пластинок обычно имеют частицы пыли. Твердые аэрозольные частицы в основном имеют неправильную форму, и им приписывается некий средний размер, например, по объему или по проекционной площади;

– Волокна или цепочки (протяженные в одном направлении) – частицы протяженные в одном направлении и имеющие сравнительно небольшие размеры – в двух других. К их числу относятся призмы, иглы, нити или минеральные волокна, содержащиеся, к примеру, в асбестовой пыли. Научные данные о волокнах как об аэродисперсных системах ограничены по сравнению с данными об аэрозолях с изометрическими частицами.

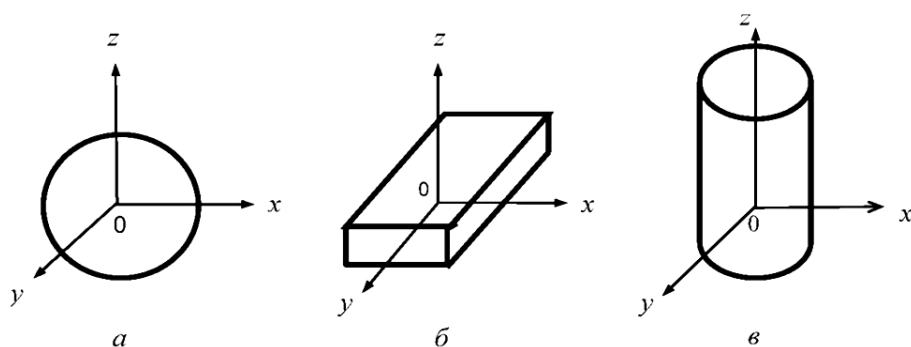


Рис. 1.4. Основные формы частиц аэрозолей:
a – изометрические частицы; *б* – пластинки; *в* – волокна

Форма частиц зависит от их фазового состояния и механизма образования. Жидкие частицы, как правило, имеют сферическую форму, тогда как твердые, обычно, – неправильную форму.

Химический состав частиц аэрозоля может быть самым разнообразным и определяется как исходными материалами, так и способами создания этих частиц. В некоторых случаях встречаются композитные частицы, состоящие из нескольких химических веществ. К примеру, кислотные осадки состоят из раствора кислоты в воде.

Аэрозоли в большинстве случаев полидисперсны, т.е. содержат частицы различного размера. Исключение составляют возгоны – пыли, образующиеся в газах в результате конденсации паров

веществ и в процессе химических реакций газообразных компонентов. Важным фактом процессов аэрозолеобразования является относительно большая высота Z выброса значительной доли частиц в атмосферу ($Z \geq 500$ м), что при малых размерах частиц r ($r \leq 1$ мкм) приводит к большому времени жизни их в атмосфере. В результате аэрозольные частицы перемещаются на значительное расстояние, в том числе в те регионы, в которых концентрация естественного аэрозоля низка.

Наиболее часто встречаются смешанные аэрозоли (рис. 1.5), дисперсная фаза которых содержит частицы, образующиеся как в результате измельчения, так и конденсации. К ним относятся выбросы металлургических предприятий, тепловых электростанций, котельных, а также аэрозоли, образующиеся при пирометаллургических процессах, сварочных работах и др.

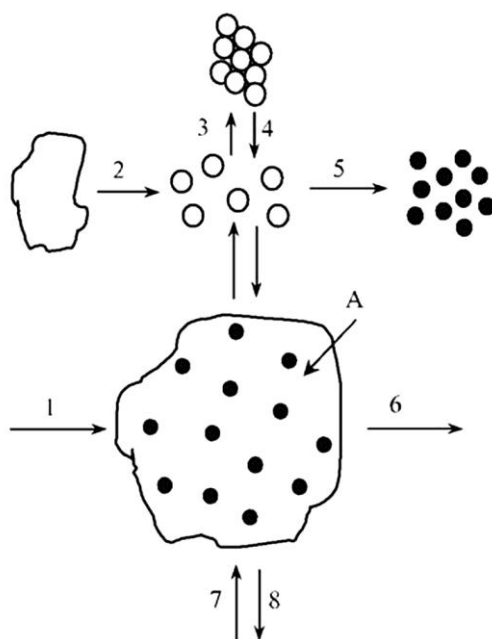


Рис. 1.5. «Жизнь аэрозольной системы» [11]:

A – аэрозоль; 1, 6 – перемещение аэрозольных частиц; 2, 5 – образование аэрозольных частиц диспергированием и конденсацией; 3, 4 – агрегирование (коагуляция) и дезагрегирование частиц дисперсной фазы; 7, 8 – отток и приток частиц

В зависимости от концентрации частиц аэрозоли подразделяются на высококонцентрированные и разреженные. Основным критерием для этой классификации является объемная концентрация частиц [11]:

$$C_v = V_q / V,$$

где V_q – объем, занимаемый частицами в аэрозольной системе, V – суммарный объем аэрозольной системы.

При $C_v > 0,1$ система называется высококонцентрированной, при $C_v < 0,1$ – разреженной. Так, в безветренную ясную погоду за городом в 1 л воздуха содержится несколько десятков тысяч частиц с общей массой меньше 10^{-7} г, а в шахте вблизи работающего угольного комбайна – миллиарды частиц с массой нескольких десятков мг (10^{-2} г) [11].

Большинство аэрозольных частиц в воздухе имеют форму близкую к изометрической (сферической). Диапазон размеров аэрозольных частиц в атмосфере очень широкий: от нескольких молекул с радиусом приблизительно 10^{-7} м, до размеров в несколько микрон. Верхний предел размеров аэрозольных частиц определяется возможностью продолжительного существования их в атмосфере, т.е. скоростью оседания. При этом к атмосферным аэрозольям обычно относят частицы со скоростями осаднения не больше, чем у капелек воды диаметром 100 мкм (крупные дождевые капли и осадки тем самым относят к отдельному классу).

Промышленные и аварийные выбросы вредных веществ в атмосферу представляют собой непосредственную опасность для окружающей среды и населения. Во-первых, процессы переноса примесей в атмосфере настолько динамичны, что последствия таких выбросов сказываются практически сразу на состоянии окружающей среды. Во-вторых, при выбросах в атмосферу загрязняются приземный слой воздуха и подстилающая поверхность (почва, водоемы, растительность), что представляет опасность поступления вредных веществ в организм человека и животных.

Потенциально опасны для органов дыхания также неорганические пыли, которые выделяются в сталелитейном и керамическом производствах, при шлифовании, золотодобыче, на рудных и угольных шахтах, котельных и т.д.

К токсичным аэрозолям относятся аэрозоли, состоящие из токсичных веществ (кислоты, щелочи, ядохимикаты, боевые отравляющие вещества, свинцовая пыль, ртуть и т.д.). Токсичные вещества поступают в организм человека через дыхательные пути (ингаляционное проникновение), желудочно-кишечный тракт и кожу. Степень отравления зависит от их агрегатного состояния и от характера технологического процесса (нагрев вещества, измельчение и др.). Помимо острых и профессиональных хронических интоксикаций, промышленные яды могут быть причиной понижения иммунитета и, как следствие, повышения общей заболеваемости [12].

Вывод об опасности загрязнения атмосферы выбросами промышленного предприятия должен основываться не только на названиях вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, но и на их объемах. Предприятие тем опаснее с точки зрения загрязнения атмосферы, чем большее количество загрязняющих веществ более низкого класса опасности оно выбрасывает.

1.2.3. Физико-химические изменения загрязняющих примесей в атмосфере и их последствия

После попадания в атмосферу загрязнения не остаются в неизменном виде; в процессе перемещения в пространстве, турбулентной диффузии происходят их физические изменения. В результате химических реакций образуются новые соединения. Наиболее распространенный в атмосфере химический процесс – окисление веществ кислородом воздуха: диоксид серы окисляется в триоксид, оксид азота – в диоксид, альдегиды – в органические кислоты, ненасыщенные углеводороды – во многие другие вещества. Даже небольшое содержание диоксида азота в атмосфере может привести к образованию больших количеств атмосферного кислорода и озона, поэтому он играет важную роль в формировании смога. Смог характеризует такое состояние атмосферы, когда снижается видимость и резко возрастает уровень загрязнений. Он отрицательно сказывается на самочувствии и здоровье людей.

При низких температурах и малом количестве кислорода разрушение углеводородов может сопровождаться их изомеризацией и поликонденсацией, что приводит к образованию полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)пирена, обладающего канцерогенными свойствами.

Климатологи отмечают, что в связи с увеличением количества взвешенных частиц в воздухе городов облачность повышается на 5–10 %, туманообразование летом увеличивается на 30 %, а число дней с осадками на 5–10 больше, чем в сельской местности. Туманообразование ведет к уменьшению естественной освещенности до 40–50 %, что требует дополнительных расходов на освещение улиц. Запыленность воздуха снижает солнечную радиацию на 15–20 %, причем ультрафиолетовая радиация летом снижается на 5 %, зимой – на 30 %, а в условиях тумана эти потери достигают 90 %.

Ряд химических реакций в атмосфере приводит к образованию кислот, что связано с повышением кислотности дождей. Основным источником образования кислотных дождей в атмосфере является диоксид серы, выбрасываемый в результате антропогенной деятельности в больших количествах. При окислении он превращается в серную кислоту и гидросульфаты, оксиды азота – в азотную кислоту. Наибольшее количество диоксида серы выбрасывают энергетические предприятия.

тия, а оксиды азота в основном поступают в атмосферу с выхлопными газами при работе двигателей внутреннего сгорания.

Металлургические предприятия выбрасывают тяжелые металлы преимущественно в нерастворимой форме, однако в ходе атмосферного переноса происходят постепенное их выщелачивание из аэрозольных частиц и переход в ионную, водорастворимую форму. Это обусловлено присутствием в атмосфере сильных кислот (HNO_3 , H_2SO_4).

Среди множества токсичных веществ, образующихся при производстве изделий металлургической промышленности, наиболее опасными являются вещества группы ПАУ (полиароматические углеводороды). Группа ПАУ объединяет вещества, для которых характерно наличие в химической структуре трех и более конденсированных бензольных колец. Холантрен, перилен, бенз(а)-пирен, дибензпирен – вещества группы ПАУ обладают канцерогенной (мутагенной) токсичностью, прекрасным адсорбентом для которых являются сажевые частицы, являющиеся составной частью загрязняющих выбросов.

Значительная часть сажи конденсируется на уже присутствующих в воздухе частицах, образуя, по терминологии Г.В. Розенберга, покровную фазу аэрозолей. Если учесть, что массовая концентрация сажи в приземном слое в промышленно развитых районах составляет от 5 до 20–30 мкг/м^3 , то становится очевидна важная роль сажи в радиационных процессах в атмосфере промышленных центров. В ряде работ рассматривалась каталитическая и фотокаталитическая активность частиц, содержащих сажу. В основном она обусловлена присутствием в таких частицах тяжелых металлов и свободных радикалов. Это обстоятельство может иметь важное климатологическое значение при выбросах продуктов сгорания на высоту озонового слоя, так как приведет к резкому уменьшению концентрации озона.

Первоначально образующиеся частицы сажи имеют радиус 0,01–0,1 мкм . В результате коагуляции эти «эмбрионные» частицы быстро рекомбинируют, поэтому атмосферное время жизни «эмбрионных» частиц должно быть достаточно мало (менее нескольких суток). Частицы с размером $r > 3 \text{ мкм}$ образуются в особо благоприятных условиях коагуляции и благодаря турбулентно обусловленному «механическому» подъему крупных частиц. Эти частицы довольно быстро выводятся из атмосферы гравитационной седиментацией. Частицы же с размером $r = 0,1\text{--}3 \text{ мкм}$ (аккумулятивная мода) могут иметь достаточно большое время жизни в атмосфере, ограниченное сверху эффективностью механизмов стока: 1 неделя в нижней тропосфере (до высоты 1,5 км), 1 – в верхней тропосфере и более года в стратосфере (рис. 1.6).

Одним из проявлений трансформации загрязнителей в атмосфере является агрегирование (слипание) мелких частиц, аэрозолей с образованием крупных устойчивых конгломератов. Основная часть пыли техногенного происхождения находится в приземном слое воздуха, рассеиваясь на площади не более 0,4 % суши. Количество пыли, оседающей в год на поверхность земли, достигает в крупных городах, промышленных центрах 300 т/км^2 .

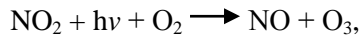
Антропогенные выбросы в атмосфере претерпевают различные химические превращения: фотолитиз – фотохимические реакции при облучении солнечным светом; озонлиз – в реакциях с атмосферным озоном; гидролиз – при реакции с атмосферной влагой, паром; окисление – соединение с кислородом. Химические атмосферные процессы с участием различных загрязнителей включают первичные реакции окисления NO , SO_2 , углеводородов с участием озона, гидроксильных радикалов и вторичные фотохимические реакции образования аэрозолей, кислот, озона.

Схема основных газофазных первичных и вторичных преобразований оксидов азота в нижних слоях атмосферы представлена на рис. 1.7.

Первичная реакция взаимодействия оксида азота с озоном



дает толчок к множеству вторичных реакций, в том числе и круговому преобразованию с повторным воспроизводством оксида азота (NO) и озона (O_3) под влиянием кванта ультрафиолетового излучения ($h\nu$):



и нитратов – твердых продуктов взаимодействия азотной кислоты с аммиаком NH_3 и другими соединениями.

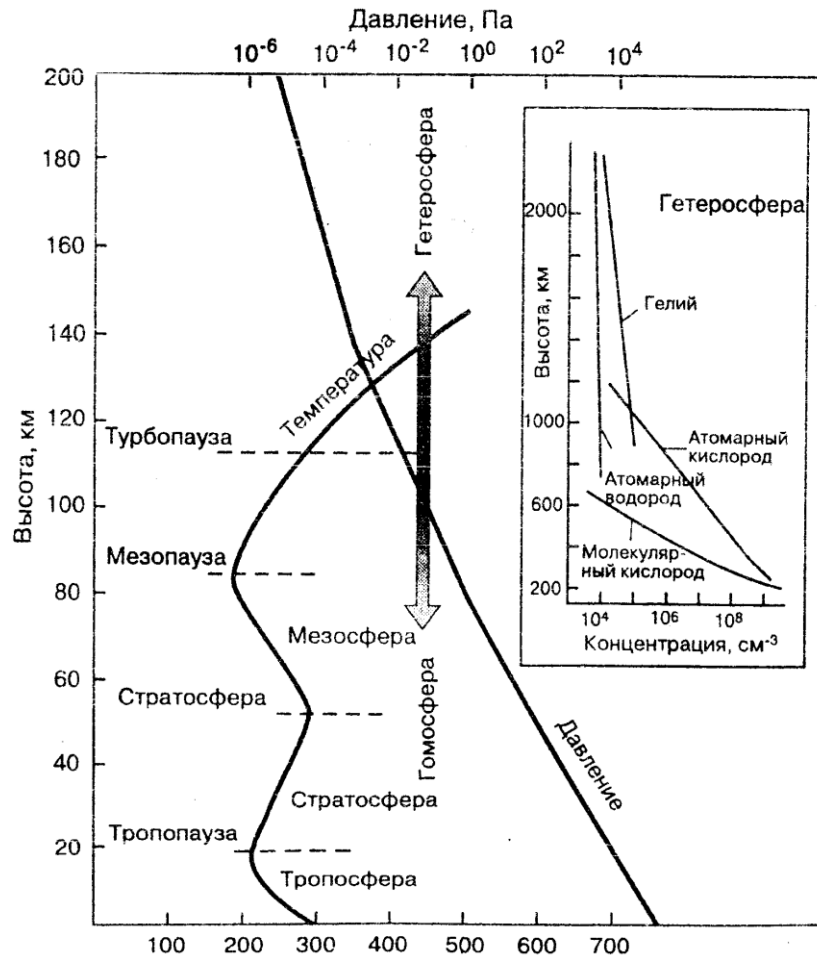


Рис. 1.6. Вертикальное строение атмосферы и соответствующие изменения температуры и давления

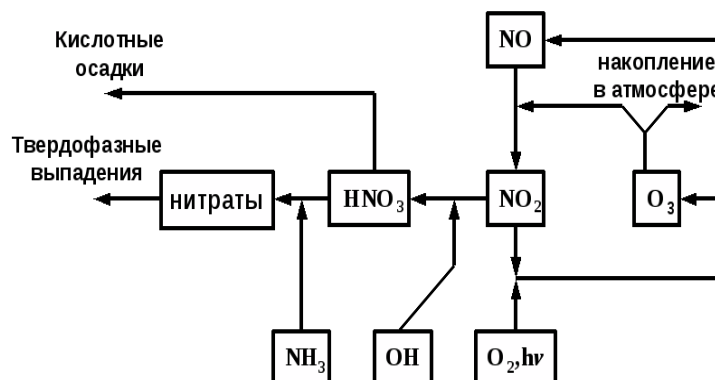
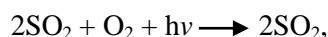
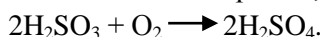


Рис. 1.7. Схема основных первичных и вторичных преобразований оксидов азота в атмосфере

Избыточное количество озона, образующееся в каждом цикле преобразования молекулы оксида азота, выводится из цикла, способствуя накоплению озона в атмосфере. Значительную роль в формировании уровня и характера загрязнения воздушного бассейна играет конверсия SO_2 в атмосфере с образованием аэрозолей: фотохимическое окисление с образованием сульфатных аэрозольных частиц:



растворение диоксида серы (SO_2) в каплях атмосферной влаги с образованием сернистой кислоты H_2SO_3 и окисление сернистой кислоты кислородом, содержащимся в каплях:



Образующиеся частицы состоят из твердых сульфатов и серной кислоты в виде тумана. Образовавшиеся аэрозоли частично выводятся из атмосферы осадками и туманами, они взаимодействуют с газообразными примесями, подвергаются коагуляции.

В атмосфере при контакте с влагой диоксиды азота и серы образуют соответствующие кислоты. В летний период при интенсивном солнечном облучении скорость превращения диоксида азота в кислоту весьма велика – 50 % диоксида азота переходит в кислоту. Вследствие высокой растворимости в воде и сорбции на увлажненной поверхности твердых частиц азотная кислота быстро выпадает на землю. Образующиеся кислоты выводятся из атмосферы с осадками – «кислотными» дождями. Кислотность осадков доходит до $\text{pH} = 1,5$. Продукты трансформации диоксида серы в атмосфере в виде осадков выпадают на поверхность литосферы (около 50 %), гидросферы (около 30 %), поглощаются растениями (около 20 %).

В отличие от оксидов азота, диоксид серы, прежде чем полностью превратится в сульфат-анион, может переноситься с массами воздуха на большие расстояния, ареал рассеивания его значительно больше.

Поступление в атмосферу твердых и газообразных веществ антропогенного происхождения порождает разветвленные цепные процессы трансформации загрязнителей. При взаимодействии загрязнителей со сложным по составу атмосферным воздухом в различных условиях (инсоляция, температура, влага, запыленность) образуется большое количество вторичных токсичных веществ, нередко более опасных, чем первичные загрязнители (NO_2 , SO_2 , углеводороды и др.).

Выделяется ряд физических процессов преобразования загрязнителей, их перехода в другие природные среды: молекулярная диффузия, возникающая при градиенте концентрации; взаимодействие загрязнителей с частицами воды (захват аэрозольных частиц, вымывание – захват вещества падающими частицами каплями воды); осаждение под действием гравитации.

Специфический характер перемещения загрязнителей складывается при явлениях сверхдальнего переноса, когда твердые частицы, аэрозоли, капли кислот переносятся на многие сотни, тысячи километров (трансграничный, трансконтинентальный). Антропогенные выбросы претерпевают различные химические превращения: фотолиз – фотохимические реакции при облучении солнечным светом; озонлиз – в реакциях с атмосферным озоном; гидролиз – при реакции с атмосферной влагой, паром; окисление – соединение с кислородом.

1.3. Поршневые двигатели внутреннего сгорания как источник экологической опасности

Современное человечество живет в эпоху небывалого развития научно-технического прогресса, сопровождающегося активным воздействием на природную среду. В этом плане ученые выделяют следующие основные направления научно-технической революции: атомизацию, механизацию умственного труда, техновещественность, космизацию, экологизацию науки и техники и ряд других [13].

Из перечисленных направлений одним из наиболее актуальных является инженерная экология, представляющая собой область науки и техники, изучающая закономерности взаимодействия общества и окружающей среды, направленная на снижение вредного воздействия техники.

В последнее время экологическая обстановка, особенно в индустриально развитых городах, где сконцентрировано большое количество промышленных предприятий и автотранспорта, вызывает серьезную обеспокоенность.

С учетом современных условий, когда промышленные предприятия работают не в полную мощность или простаивают, основным источником загрязнения окружающей среды в городах яв-

ляется автомобильный транспорт, количество которого непрерывно растет. По прогнозам специалистов к 2 000 году в мире ожидается увеличение численности автомобильного парка до 700 млн единиц [14].

В автомобильных двигателях внутреннего сгорания в мире ежегодно сжигается около 2 млрд т нефтяного топлива. При этом коэффициент полезного действия в среднем составляет 23 %, остальные 77 % уходят на обогрев окружающей среды [15].

В России автотранспорт ежедневно выбрасывает в атмосферу 16,6 млн т загрязняющих веществ [16]. В крупных городах доля загрязнения воздуха автотранспортом достигает 70–80 % от общего уровня загрязнения [17], в Москве и Санкт-Петербурге – 90–95 % [8]. В России 46 городов, атмосфера которых в одинаковых пропорциях загрязняется выбросами со стационарных источников и автотранспортом. В основном это крупные региональные столицы (рис. 1.8): Новосибирск, Красноярск, Омск, Волгоград, Барнаул, Оренбург, Уфа, Хабаровск, Ярославль, Кемерово, Челябинск, Рязань [8].

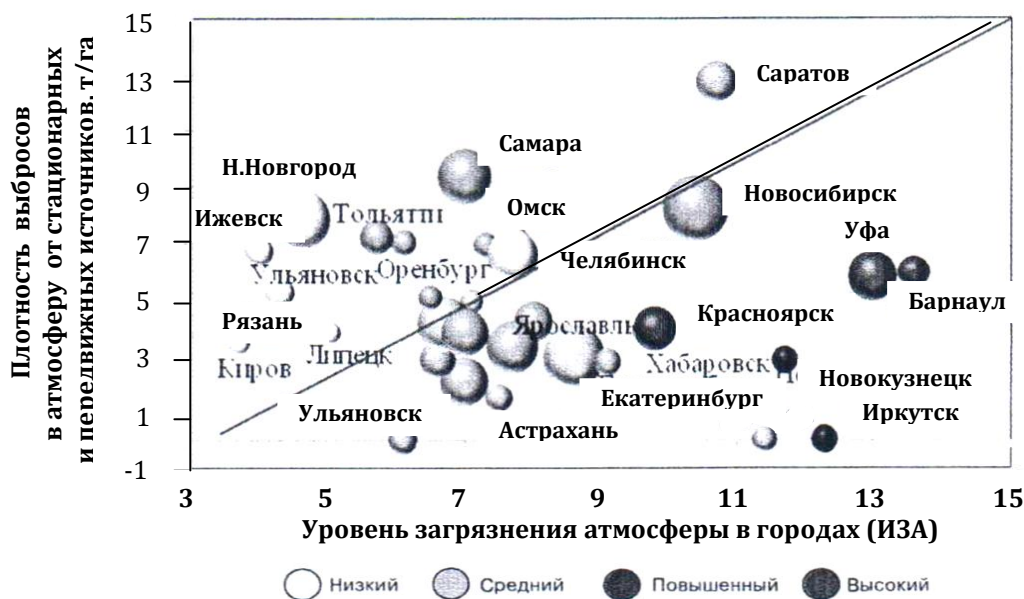


Рис. 1.8. Распределение городов России в зависимости от плотности выбросов в атмосферу стационарными и передвижными источниками её загрязнения (2008 г.) [8]: диаметр знака пропорционален численности населения города, а цвет – плотности загрязнения атмосферы (рассеивающей её способности)

В 2001 г. в Челябинской области эксплуатировалось 308,7 тыс. автомобилей, а выбросы загрязняющих веществ от них составили 131,8 тыс. т [18].

В настоящее время практически вся наземная мобильная техника в качестве силовых установок использует двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и среди них прежде всего поршневые (ПДВС), работа которых в плане воздействия на окружающую среду сопровождается многими негативными особенностями. Прежде всего, это выброс в атмосферу значительного количества вредных веществ (до 39 % от общего количества токсичных веществ, выбрасываемых всеми источниками в атмосферу [19]) и теплоты.

Двигатели внутреннего сгорания «сжигают» огромное количество атмосферного кислорода, работа их сопровождается шумом и вибрацией. Два последних фактора не являются предметом рассмотрения в настоящем исследовании, т.к. работа использованного утилизионного двигателя не имеет заметного влияния на эти показатели.

Принято считать, что основной вред окружающей среде в мегаполисах наносят вредные выбросы ПДВС. Поэтому рассмотрим вначале вопросы, связанные с этой проблемой.

1.3.1. Состав отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания

В отработавших газах (ОГ) ПДВС обнаружено более 280 компонентов [20]. В зависимости от характера воздействия на организм человека, вещества, содержащиеся в ОГ, подразделяются на две группы, одну из которых составляют нетоксичные компоненты. Это азот, кислород, водород, водяной пар, а также углекислый газ. В тоже время в группу токсичных веществ входят: оксид углерода, оксиды азота, многочисленная группа углеводородов (парафины, олефины, ароматические соединения и другие). Сюда же относятся альдегиды и сажа. Особое место в этой группе занимают канцерогенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), составная часть смолистых возгонов, в том числе наиболее активный бенз(а)пирен, присутствующий как в газовой фазе ОГ, так и на дисперсных частицах сажевых выбросов. Причем концентрация бенз(а)пирена на дисперсных частицах сажевых выбросов в 3–4 раза выше, чем в потоке ОГ [21].

Природа образования разных токсичных веществ – продуктов неполного сгорания и оксидов азота – имеет принципиально различный механизм. Первая группа веществ связана с химическими реакциями окисления топлива. Реакция образования оксидов азота носит термический характер.

Состав ОГ дизельных двигателей и двигателей с принудительным воспламенением топлива различен, что заложено в способах смесеобразования.

Для дизельных двигателей (работающих при коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 1$) характерно относительно малое содержание в ОГ продуктов неполного сгорания – углеводородов и оксида углерода – относительно высокое содержание свободного кислорода. Для ПДВС с принудительным воспламенением топлива (работающих с коэффициентом избытка воздуха $\alpha < 1$) характерно относительно высокое содержание оксида углерода, углеводородов и относительно низкое содержание свободного кислорода в ОГ [22].

Сравнительные данные о составе ОГ автомобильных двигателей приведены в таблице 1.3 [23].

Таблица 1.3

Основные компоненты отработавших газов автомобильных ПДВС и их содержание в % по объему

Основные компоненты	Содержание, % по объему в двигателях	
	дизельных	бензиновых
Азот	76–78	74–77
Кислород	2–18	0,3–0,8
Водород	0,01–0,5	0,1–5,0
Пары воды	0,5–4,0	3,0–5,5
Углекислый газ	1,0–10,0	5,0–12,0
Оксид углерода	0,01–0,5	0,5–12,0
Оксиды азота	0,004–0,5	0,01–0,8
Углеводороды (суммарно)	0,009–0,5	0,2–3,0
Сернистый ангидрит	0,003–0,05	–
Альдегиды	0,001–0,009	0,0–0,2
Сажа, г/м ³	0,01–1,5	0,0–0,04
Бенз(а)пирен, кг/м ³	0,0–10,0	0,0–20,0
Свинец (% от общего содержания Рв в топливе)	–	50–75

1.3.2. Влияние отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания на состояние окружающей среды

Отработавшие газы любых ПДВС с точки зрения экологии обладает двумя существенными принципиально неустраняемыми недостатками. Первый – выброс в окружающую среду значи-

тельного количества токсичных веществ, второй – тепловое «загрязнение» окружающей среды и связанное с этим потепление климата планеты.

Рассмотрим каждый из них более подробно.

Уровни вредных выбросов двигателей различных типов целесообразно рассматривать в сравнении. В таблице 1.4 приведены данные об основных токсичных компонентах в выбросах различных типов ПДВС [23].

Доля выбросов автомобилей в глобальном загрязнении атмосферы городов, например оксидами азота, составляет: в штате Калифорния (США) – 50–80 %, Афинах – 50–51 %, Москве – 32,6 %, Санкт-Петербурге – 31,7 % [24].

Таблица 1.4

**Сравнение основных токсичных компонентов
в выбросах различных типов ПДВС одинаковой мощности**

Тип ПДВС	Выбросы вредных веществ, г/км			g _e , г/(кВт·ч)
	СО	С _x Н _y	NO _x	
Бензиновый двигатель	14,4	1,37	2,5	306
Дизель	3,12	2,28	2,5	245

Только автомобильный транспорт России выделяет до 34 % от общих выбросов всеми источниками оксидов углерода (СО) и до 64 % оксидов азота (NO_x), что составляет в год: по СО – 7,48 млн т, по NO_x – 6,4 млн т [25].

По оценкам специалистов ежегодные суммарные автомобильные выбросы в СНГ составляют 400 млн т [15], среди которых:

- 27 млн т оксиды углерода;
- 2,5 млн т углеводороды;
- 9 млн т оксиды азота;
- 200–300 млн т углекислого газа.

Индекс загрязнения атмосферного воздуха (отношение фактического загрязнения к предельно допустимому) ингредиентами, поступающими в атмосферу с ОГ от автотранспорта (оксид углерода, диоксид азота, формальдегид, бенз(а)пирен, свинец, пыль), в городе Челябинске составляет от 10,9 до 39,5 [26]. На наиболее нагруженных пересечениях автомагистралей (с интенсивностью движения 4 000 автомобилей в час и более) индекс загрязнения атмосферного воздуха превышает значение 62 [21].

Масштабы загрязнения окружающей среды можно хорошо представить, учитывая, что при сгорании одной тонны бензина выбрасывается до 456 кг – СО, 23 кг – С_xН_y, 16 кг – NO_x, 1,86 кг – SO₂ и 0,93 кг – альдегидов. При сгорании одной тонны дизельного топлива в биосферу выбрасывается до 21 кг – СО, 4 кг – С_xН_y, 18,8 кг – NO_x, 0,78 кг – альдегидов [28].

Среди опасных токсичных компонентов ОГ можно выделить диоксид азота (NO₂) и его полимер N₂O₄. Оксиды азота раздражающе действуют на слизистые оболочки глаз, носа, остаются в легких в виде азотной и азотистых кислот, образующихся в результате взаимодействия NO₂ и N₂O₄ с влагой верхних дыхательных путей. В результате фотохимических реакций на солнечном свете из оксида азота образуется диоксид азота, который вместе с углеводородами является причиной образования токсических туманов [29].

Оксид углерода (СО), поступая в организм человека, снижает функцию кислородного питания, выполняемую кровью, так как поглощаемость СО кровью в 240 раз выше поглощаемости кислорода.

Токсичность канцерогенных веществ практически не поддается оценке. Хотя их концентрация в отработавших газах обычно очень мала, но опасность состоит в том, что, попадая в легкие, эти вещества накапливаются в организме, способствуя заболеванию раком. Длительное воздействие высоких концентраций дизельных частиц, согласно данным Health Effect Institute (США), на 40 %

повышают риск возникновения рака легких [30]. Свойством накапливаться в организме обладают и оксиды свинца.

Международным Агентством исследований по канцерогенезу (International Agency Research on Cancer) 16 углеводородов классифицированы как возможно канцерогенные для человека, а такие полициклические ароматические углеводороды, как бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен и дибенз(а)-антрацен определены как «безусловно канцерогены» [31–34]. Установлено, что в материале дизельных частиц содержится 200 различных соединений с выраженной мутагенной и канцерогенной активностью [35–38].

Острота проблемы загрязнения окружающей среды усугубляется тем, что ОГ автотранспорта поступают в приземной слой атмосферы, обуславливая накопление вредных веществ в различных объектах природной среды. Наличие узких улиц и зданий повышенной этажности способствует накоплению вредных соединений ОГ в атмосфере в зоне дыхания пешеходов, пассажиров и водителей автотранспорта.

Под воздействием ОГ ПДВС разрушаются памятники культуры, особенно из мрамора, бетонные и металлические конструкции. Азотная кислота, например, образующаяся в результате взаимодействия оксидов азота и атмосферной влаги, вызывает коррозию углеродистой стали. Это приводит к сокращению межремонтных сроков металлических крыш в 6–7 раз, а провода связи в крупных городах служат в 10–12 раз меньше, чем в сельской местности [39]. Воздействие на флору выражается в гибели отдельных видов растений и деревьев.

Наиболее объективным показателем уровня загрязнения окружающей среды является состояние здоровья городского населения. По данным Всемирной организации здравоохранения, в индустриальных городах показатели онкологических заболеваний и смертности примерно в два раза выше, чем в сельских районах [40]. С вредным воздействием ОГ автотранспорта прямо или косвенно связано до 80 % заболеваний [41].

Среди шестидесяти наиболее развитых стран мира Россия занимает 56 место по продолжительности жизни у мужчин и 47 у женщин [42]. Хронические заболевания отмечаются у 15–20 % дошкольников и более чем у половины детей школьного возраста [39].

Кислотные дожди, содержащие растворы серной и азотной кислот, наносят значительный ущерб природе. В Москве и Санкт-Петербурге с кислотными дождями на землю в год выпадает до 1 500 кг серы на 1 км².

На территории России в 1996 г. вместе с осадками выпало более 4 млн т серы и 1,25 млн т нитратного азота [43].

Вторая не менее экологически вредная особенность ПДВС заключается в том, что выбрасываемые в атмосферу газы имеют высокую температуру (до 700 °С). Кроме того, с ОГ в окружающую среду ежегодно попадает 10¹⁰ т углекислого газа. Всего же в атмосфере планеты содержится 2,3·10¹² т этого газа [44]. Углекислый газ считают «парниковым» газом и доля его «вклада» в парниковый эффект составляет не менее половины от общего количества.

Изменение климата в результате антропогенных выбросов парниковых газов ведет к крупномасштабным негативным последствиям практически во всех областях деятельности человека. Наиболее значительному потеплению подвержены высокие широты Земли, в которых расположена значительная часть территории России.

Инструментально доказано, что ежегодное накопление CO₂ в атмосфере составляет 0,4 %. Каждый год в атмосферу поступает 6 млрд т углекислого газа, из них 3 млрд т поглощаются растениями в процессах фотосинтеза, оставшиеся 3 млрд т накапливаются. Общая сумма накоплений за прошедшие сто лет составила около 170 млрд т [45].

За последние десять лет средний уровень температуры повысился в Лондоне с 9,5 до 9,7 °С, Стокгольме с 6,2 до 6,5 °С, Мадриде с 14,0 до 14,3 °С. Повышение температуры приводит к увеличению темпов опустынивания, таянию накопленных на Земле льдов и подъему уровня Ми-

рового океана. Темпы опустынивания в настоящее время составляют 6 млн га в год или 11 га в минуту [46].

Специалисты считают, что если количество углекислого газа в атмосфере Земли увеличится на 20 % и его содержание достигнет 0,0379 % по объему, можно ожидать заметного повышения температуры на планете, которое уже сегодня составляет 1 °К в год. Это приведет к таянию ледников на полюсах через 20–25 лет и поднятию уровня мирового океана примерно на 70 м. Произойдет затопление более 20 % земной поверхности [47].

В 1992 г. страны-члены ООН подписали рамочную Конвенцию ООН об изменении климата, которая ратифицирована Российской Федерацией 4 ноября 1994 г. и вступила в силу 6 марта 1995 г. Конечная цель Конвенции заключается в том, чтобы добиться стабилизации парниковых газов в атмосфере на уровне, не допускающем опасного антропогенного воздействия на климатическую систему.

В 1996 г. правительство России приняло Федеральную целевую программу «Предотвращение опасных изменений климата и их отрицательных последствий» [17]. С 1997 г. утверждена программа «Оздоровление окружающей среды г. Москвы», введена система инструментального контроля всех транспортных средств при прохождении ежегодного государственного технического осмотра. Такая система осмотра уменьшит количество вредных выбросов на 16 %, уровень шума на 18 % [28].

1.3.3. Расходование атмосферного кислорода

Не менее серьезный ущерб окружающей среде наносят ПДВС в связи с расходом атмосферного кислорода для сжигания топлива. При этом следует помнить, что кислород расходуется независимо от того, какое топливо сжигается в цилиндрах: дизельное или бензин, спирт, газ или чистый водород и каким будет состав ОГ. Например, сжигание только 1 кг бензина требует около 3 кг кислорода. За один час работы двигателя легкового автомобиля среднего класса расходуется столько кислорода, сколько его требуется одному человеку для дыхания в течение месяца [48].

Непрерывный рост автомобильного парка ведет к резкому увеличению расхода атмосферного воздуха. Так если в 1973 г. «сжигалось» 23 % кислорода, производимого всей наземной растительностью, то в 1993 г. эта цифра достигла 90 %. Такая динамика не удивительна, ведь количество кислорода, выделяемое 1 га лесных насаждений за год, легковой автомобиль среднего класса «сжигает» всего за месяц работы [48].

Ученым уже ясно [49–52 и др.], что ухудшение состояния окружающей среды и здоровья людей происходит и будет дальше происходить, не столько из-за выбросов токсичных веществ, содержащихся в ОГ ПДВС, сколько из-за дефицита кислорода в атмосфере Земли. Медицинские исследования свидетельствуют о том, что при объемном содержании кислорода во вдыхаемом воздухе менее 15 % наступает смерть (таблица 1.5).

Ситуация, имеющая место с кислородом, свидетельствует о том, что проблема кислородного «голодания» возникнет раньше, чем топливный «голод», который может произойти через 50 лет.

Таблица 1.5

Влияние содержания кислорода в воздухе на состояние здоровья человека

Содержание кислорода в воздухе, % по объему	Состояние здоровья человека
20,94	Нормальное
18,32	Первые признаки кислородной недостаточности
14,39	При длительном вдыхании смерть
7,85	Смерть

1.3.4. Нормирование вредного воздействия на окружающую среду отработавших газов двигателей внутреннего сгорания

Дальнейшее развитие и повышение эффективности использования наземной мобильной техники неразрывно связаны с решением проблемы загрязнения окружающей среды. В этом плане важную роль играет нормирование вредного воздействия ПДВС на окружающую среду. В нашей стране одними из основных руководящих документов в данной области являются:

ГОСТ 17.2.2.01-84. Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений.

ГОСТ 17.2.2.02-86. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений дымности отработавших газов тракторных и комбайновых дизелей.

ГОСТ 17.2.2.03-87. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений содержания окиси углерода и углеводородов в отработавших газах автомобилей с бензиновыми двигателями. Требования безопасности.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.695-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

ГОСТ 17.2.2.05-97. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений выбросов вредных веществ с отработавшими газами тракторных и комбайновых дизелей.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.696-98. Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Письмо Комиссии по государственному санитарно-эпидемиологическому нормированию Минздрава РФ исх. № ФК-13-4-155 от 30.03.98 г.

ГОСТ Р 51249-99. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения.

ГОСТ Р 51249-99. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения.

ГОСТ Р 41.96-99 (Правила ЕЭК ООН № 96) Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями.

ГОСТ 17.2.2.07-2000. Охрана природы. Атмосфера. Поршневые двигатели внутреннего сгорания для малогабаритных тракторов и средств малой механизации. Нормы и методы измерения выбросов вредных веществ с отработавшими газами и дымности отработавшими газам.

ОСТ 23.3.25-98Р Двигатели внутреннего сгорания для средств малой механизации. Нормы и методы измерения состава отработавших газов.

ГОСТ Р ИСО 14031-2001 Управление окружающей средой. Оценивание экологической эффективности. Общие требования.

Для бензиновых автомобильных двигателей ГОСТ регламентирует содержание оксида углерода и углеводородов в ОГ (ГОСТ 17.2.2.03-87). Ограничивается содержание СО и C_xH_y , определяемое при работе двигателя на холостом ходу для двух частот вращения коленчатого вала: минимальной (n_{\min}) и повышенной ($n_{\text{пов}}$) в диапазоне от 2000 мин⁻¹ до 0,8 $n_{\text{ном}}$. Проверка производится после проведения ТО-2.

У автомобильных дизелей ГОСТ 17.2.2.01-84 регламентирует дымность ОГ. Данный документ устанавливает предельно допустимые нормы дымности от условного расхода ОГ при работе дизелей на установившихся режимах. ОСТ 37.001.054-86 «Автомобили и двигатели. Выбросы вредных веществ. Нормы и методы определения» устанавливает предельно допустимые нормы и методы определения массы оксида углерода, углеводородов и оксидов азота в отработавших газах автомобилей с полной массой не более 3 500 кг и автобусов с числом мест для сидения не более 12 с четырехтактными дизелями.

Согласно действующим в России санитарным нормам длительно допустимая концентрация оксида углерода составляет 1 мг на 1 м³ воздуха. [53]. Токсичность двуоксида азота в десять раз

выше, чем токсичность оксида углерода, то есть его концентрация в воздухе не должна превышать одной десятиллионной доли по объему [54].

В связи с присоединением России к европейским экологическим Программам (Правила ЕЭК ООН), возникла острая необходимость в разработке нового стандарта, в организации промышленного производства автомобильных бензинов и дизельных топлив, отвечающих европейским требованиям к качеству автомобильных бензинов (Е № 228) и дизельных топлив (Е № 590) [55]. Согласно данным программам европейские бензины должны удовлетворять следующим нормам: содержание серы – не более 0,05 %, бензола – не более 5 %, свинца – не более 0,01 г/л [56].

Анализируя требования к дальнейшему совершенствованию силовых установок, в частности ПДВС, с целью повышения их технико-экономических и экологических показателей, можно выделить следующее основное направление деятельности – разработка мероприятий, обеспечивающих достижение компромисса между повышением численности единиц автомобильной техники с одной стороны, с другой стороны – соответствие силовых установок автомобильной техники по выбросу вредных веществ требованиям экологической безопасности, в частности Правилам ЕЭК ООН (Евро-1, 2, 3, 4, 5).

1.4. Пути снижения вредного воздействия отработавших газов на окружающую среду

Уменьшение выброса вредных веществ с ОГ ПДВС может быть достигнуто с помощью целого комплекса разнообразных мероприятий: технических, внедряемых в процессе создания двигателей и связанных с изменением конструкции и регулировок двигателей; организационно-технических, осуществляемых в стадии эксплуатации автомобильной техники. Все эти мероприятия могут быть отнесены к одному из четырех направлений [57].

Первое направление объединяет решения, затрагивающие рабочий цикл двигателя и воздействующие непосредственно на процессы образования вредных веществ в его цилиндрах. Сюда относятся: совершенствование конструкции камеры сгорания, выпускной и впускной систем, системы питания двигателя; впрыск воды; рециркуляция ОГ и ряд других мероприятий.

Второе направление заключается в обезвреживании вышедших из цилиндра продуктов сгорания специальными дополнительными устройствами – нейтрализаторами, встроенными в выпускную систему двигателя. Такие системы позволяют без значительных изменений в конструкции двигателя существенно снизить выбросы вредных веществ.

Третье направление предполагает замену традиционных топлив нефтяного происхождения другими, альтернативными топливами, выделяющими при сгорании меньшее количество вредных веществ (газообразными топливами, топливными смесями и др.), либо использование присадок, обеспечивающих снижение выброса токсичных компонентов.

Последнее, четвертое, направление включает мероприятия по обеспечению оптимальных регулировок и режимов эксплуатации двигателя.

1.4.1. Совершенствование конструкции двигателя и его систем

Токсичность двигателя с принудительным воспламенением топлива можно существенно уменьшить путем совершенствования конструкции и формы камеры сгорания, впускной и выпускной систем двигателя, применения непосредственного впрыскивания топлива, организации послонного смесеобразования, впрыска воды и проведения ряда других мероприятий.

Конструкция камеры сгорания должна обеспечивать минимальный объем зоны гашения, от величины которой зависит концентрация несгоревших углеводородов в ОГ. Объем зоны гашения зависит от относительной поверхности камеры сгорания, ее формы, конструкции поршня и первого компрессионного кольца. Уменьшение указанного объема заметно сокращает выход C_xH_y .

Так изменение относительной поверхности в два раза снижает содержание C_xH_y более чем на половину [58].

Совершенствование впускной системы позволяет улучшить качество смесеобразования, уменьшить неравномерность распределения смеси по цилиндрам и изменение состава смеси от цикла к циклу. В этом плане ведутся работы в таких направлениях, как: гомогенизация топливовоздушной смеси; применение предварительного смесеобразования (получение топливовоздушной смеси в специальных устройствах); подогрев топливовоздушной смеси во впускной системе; установка двойных впускных трубопроводов и др.

Эффективным средством снижения концентрации CO и C_xH_y является непосредственное впрыскивание топлива в цилиндр, за счет чего существенно улучшается равномерность распределения топлива по отдельным цилиндрам многоцилиндрового двигателя, а также уменьшается цикловая неравномерность [58–59].

Результаты экспериментальных исследований показывают, что при одинаковых параметрах рабочего процесса за счет применения расслоенного смесеобразования в двухкамерном дизеле можно снизить концентрацию оксидов азота в ОГ двигателя на 60–65 % по сравнению с двигателем с объемным смесеобразованием и неразделенной камерой сгорания [60].

Вне зависимости от типа, класса, размерности и конструктивных особенностей дизелей первое место среди вредных выбросов практически на всех режимах работы занимают оксиды азота. В суммарной токсичности они могут составлять на многих эксплуатационных режимах до 80 % [61]. Однако на режимах работы двигателя, характеризующихся малым коэффициентом избытка воздуха (режим перегрузок, приема нагрузки и т. д.), решающее значение в суммарной токсичности дизелей может иметь сажа [62].

Учитывая природу образования оксидов азота и сажи, есть возможность влиять на их выход, совершенствуя конструкцию двигателя и его системы [63–64].

Большое влияние на токсичность дизелей в интегральном плане оказывают характеристики топливной системы: продолжительность и давление впрыскивания, размеры сопловых отверстий и объем колодца распылителя. При этом следует помнить, что чем больше продолжительность впрыскивания, тем позже заканчивается сгорание в ходе расширения, тем ниже максимальная температура цикла и концентрация NO_x . Однако чрезмерно продолжительное впрыскивание существенно затягивает процесс сгорания и ухудшает экономичность двигателя. Увеличивается при этом и сажеобразование, так как растет количество топлива, сгорающего в диффузионный период.

Повышение давления впрыскивания топлива улучшает мелкость распыливания и дальнобойность факела, что значительно повышает топливную экономичность и снижает уровень выбросов сажи и дымность отработавших газов [52].

Анализ состояния и тенденций развития дизелестроения показывает, что традиционные гидромеханические системы топливоподачи исчерпали свои возможности на уровне Евро-2 и радикальное совершенствование характеристик двигателей с целью выполнения требований Евро-2 возможно только при использовании электронных систем управления топливоподачей с повышенной энергией впрыскивания [65].

Применение насос-форсунок с гидроимпульсным управлением приводит к увеличению максимального давления впрыскивания до 80–120 МПа, а в ряде случаев – до 200 МПа [66]. И, как следствие, дымность ОГ по шкале Hartiolge (Bosch) снижается с 10,4 до 1,13 [67].

Одной из основных причин образования углеводородов в цилиндре дизеля является истечение топлива из подыгольного объема и каналов сопловых отверстий с малой скоростью после посадки иглы на седло в конце впрыскивания [68]. Исследования показывают, что при изменении объема колодца от 0 до 1,2 мм выход C_xH_y увеличивается в пять раз [69].

Большое влияние на уровни вредных выбросов оказывает величина степени сжатия [70–71].

Говоря о способах воздействия на рабочий процесс, отметим рециркуляцию ОГ. Одной из самых распространенных схем рециркуляции ОГ является направление части их во впускной трубопровод из выпускного [72–73], что приводит к снижению выбросов оксидов азота в два раза.

В Алтайском государственном техническом университете разработан ряд устройств, обеспечивающих межцилиндровый перепуск ОГ, идея которых может успешно использоваться как на дизелях, так и на карбюраторных двигателях. При осуществлении перепуска ОГ из цилиндра в цилиндр [74] содержание оксидов азота снижается на 30–45 %, сажесодержание и экономичность остаются без изменений [75]. Специалистами было предложено охлаждение перепускаемых газов водоспиртованными растворами. Это позволило снизить расход топлива на 2,5–10 %, уменьшить выбросы NO_x на 35–60 %, дымность ОГ – на 10–25 % [76].

В конце XX века на кафедре Судовых энергетических установок и автоматики Московской государственной академии водного транспорта проводились исследования различных способов снижения вредных выбросов судового дизель-генератора. В результате предложено комплексное решение проблем снижения токсичности отработавших газов. Система рециркуляции ОГ подключается после нейтрализатора – фильтра системы «Нейтраль-Эко» – и совместно с ним позволяет снижать продукты неполного сгорания на 60–70 % и сажу на 90 % [77].

Улучшение показателей токсичности ОГ достигается также применением среднего и высокого турбонаддува с охлаждением наддувочного воздуха, при этом снижается теплонапряженность деталей, образующих камеру сгорания, уменьшаются дымность и токсичность ОГ [78].

1.4.2. Обезвреживание отработавших газов с помощью специальных устройств

Учитывая, что практически все конструктивные решения, направленные на уменьшение вредных выбросов, приводят к снижению топливной экономичности, наиболее перспективным и целесообразным на современном этапе можно считать внедрение в практику специальных устройств – нейтрализаторов ОГ в сочетании с малотоксичными регулировками.

Устанавливаемые в выхлопных трактах автомобилей нейтрализаторы снизили суммарный выброс токсичных веществ, например в США, с 76 млн т в 1980 г. до 55 млн т в 1985 г. Нейтрализаторами в этой стране оборудованы более 85 % автомобилей [79].

Различают три метода нейтрализации: термический, каталитический и жидкостной. Первые два метода целесообразно сочетать с фильтрацией твердых частиц (сажи) [80].

Термическая нейтрализация

Термическая нейтрализация основана на принципе доокисления продуктов неполного сгорания при условии поддержания высоких температур и дополнительной подачи окислителя.

По данным J. Eltinge [79], при работе карбюраторного двигателя на бедных смесях тепловой экран уменьшает концентрацию C_xH_y в ОГ на 10–23 % (в зависимости от угла опережения зажигания).

Термические реакторы представляют собой реакционные камеры, встроенные в выпускную систему двигателя. Оптимальное протекание процесса окисления соответствует добавлению вторичного воздуха в количестве 15–40 % от расхода ОГ.

В пламенных дожигателях температура ОГ повышается вследствие сжигания дополнительного количества топлива, впрыскиваемого через дополнительную форсунку. Такие дожигатели в связи со сложностью конструкции и необходимостью дополнительного расхода топлива высокой пожароопасностью не нашли широкого применения [81].

Таким образом, термическая нейтрализация является малоэффективным способом снижения токсичности ОГ.

Каталитическая нейтрализация

Метод каталитической нейтрализации ОГ ПДВС – один из наиболее перспективных. Сущность этого способа заключается в беспламенном окислении горючих компонентов ОГ на поверхности катализатора.

В каталитических нейтрализаторах (КН) используют высокоактивные катализаторы, содержащие платину, палладий, никель, хром, медь, оксиды металлов и редкоземельные элементы. В качестве катализаторов применяют и природные материалы, например, дуниты, цеолиты и другие. Каталитические нейтрализаторы с платиновыми катализаторами, например П-7, обеспечивают снижение выбросов оксидов азота дизелей на 56 %, а алюмоплатиновыми – на 30 %, а с меднохромокислыми – на 80 %, с катализаторами ШПАК – в три раза. В присутствии платиновых и палладиевых катализаторов обеспечивается снижение содержания СО в ОГ на 50–80 %. Снижение содержания C_xH_y при этом происходит на 20–1 000 %, а при использовании меднохромокислых катализаторов на 80 % [82].

При использовании всех названных выше катализаторов содержание сажи в ОГ снижается примерно в 1,1–2 раза, выбросов альдегидов в 3–10 раз, кроме этого отмечается снижение уровня запаха ОГ [83–84 и др.].

Необходимо отметить то, что существующие к настоящему времени катализаторы имеют высокую эффективность лишь на режимах эксплуатации, обеспечивающих температуры ОГ на входе в нейтрализаторы порядка 520–750 °К. При этих температурах нейтрализаторы окислительно-восстановительного типа снижают выбросы: оксидов азота на 40–60 %, углеводородов на 60–80 %, оксида углерода – на 70–90 % [85]. В действительности температуры ОГ зачастую значительно ниже. Поэтому одним из перспективных путей повышения эффективности каталитических нейтрализаторов является конвертирование дизелей на двигатели постоянной мощности.

В Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова разработан целый ряд каталитических нейтрализаторов ОГ дизелей с пористыми оболочными носителями катализатора [86], получаемых с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-технологий). ЦНИДИ в содружестве с Государственным институтом прикладной химии разработал образцы блочных катализаторов на основе соединений Cu, Cr, сочетающих высокую эффективность с устойчивостью к отравляющему воздействию SO_2 и других агрессивных веществ [87–88].

Сложность использования КН заключается в осмолении и загрязнении катализаторов сажей за сравнительно небольшой период работы, кроме этого, КН испытывают серьезные термические и механические нагрузки в процессе эксплуатации. Следствием этого является необходимость изготовления элементов конструкции из дорогостоящих нержавеющей сталей.

Жидкостная нейтрализация

Жидкостная нейтрализация ОГ ПДВС является достаточно разработанным и апробированным методом снижения вредных выбросов. Она основана на задержании сажи, твердых частиц и химической очистке ОГ путем пропускания их через воду или водные растворы химических реагентов.

При жидкостной нейтрализации поглощение оксидов азота может составить до 10–30 % от исходной концентрации. В зависимости от состава реагента может поглощаться до 80 % оксида углерода. Свежими реагентами альдегиды поглощаются на 50 %. Однако уже после восьми часов работы токсичные вещества перестают поглощаться из-за насыщения растворов [89].

Очистка газов от сажи осуществляется на 10–80 % в зависимости от режима эксплуатации ПДВС. В жидкостных нейтрализаторах происходит значительное снижение уровней запаха ОГ и эффективное глушение шума выхлопа.

Сложность обслуживания жидкостных нейтрализаторов заключается в частой схеме растворов в реакторах (как правило, каждые 8 часов работы); необходимости дозаправки водой через каждые 1,5–2 часа. Кроме того, недостатками рассматриваемых нейтрализаторов являются: больше масса

и габариты, неэффективность очистки ОГ от CO и NO_x, невозможность применения в условиях отрицательных температур окружающего воздуха [90].

1.4.3. Использование нетрадиционных топлив и применение присадок

В условиях топливно-энергетического кризиса при поисках альтернативных топлив выбирают такие, которые в первую очередь не требовали бы коренной переделки ПДВС, а ограничивались бы изменениями в системах питания и зажигания.

В качестве нетрадиционных видов моторных топлив могут применяться газообразные (метан, природный газ, водород, пропан, метанол, этанол и их смеси), жидкие (спирты, бензол, каменноугольные смолы), синтетические жидкие топлива (продукты переработки сланцев, угля и другие) [91–93 и др.].

Водород считается топливом будущего, он широко распространен в природе (до 1 % массы Земли), не ядовит, имеет высокую теплоту сгорания. Создание на основе базовой конструкции ППДВС двигателя с частичным замещением традиционного топлива водородом, является одним из самых перспективных направлений по снижению токсичности ОГ [94–95].

Осуществление подачи природного газа на впуск дизелей приводит к росту выбросов NO_x на 20 %, газового конденсата – к снижению выбросов NO_x на 40–60 % [96].

Для улучшения характеристик самовоспламенения топлива в дизелях в спирты добавляют активаторы, например, триэтиленгликоль, динитрат, смазывающие и антиокислительные присадки [94].

При переводе дизелей на спирты проводят корректировки угла опережения впрыскивания топлива, оптимизируются размеры сопловых каналов форсунок, разгрузочный объем нагнетательного клапана ТНВД. В результате проведенных фирмой «Даймлер-Бенц» работ по определению характеристик дизелей, работающих на спиртовых топливах, установлено, что при подаче до 40 % метанола на впуск двигателя происходит снижение выбросов NO_x на 30 % [96].

В исследованиях, проведенных канадским отделением фирмы General Motors на ДВС, работающем на смеси 85 % (по объему) неэтилированного бензина с 15 % метанола, содержание CO, NO_x, C_xH_y было существенно ниже норм, предусмотренных стандартом на содержание в ОГ CO и C_xH_y [98].

Добавлением к топливу присадок можно изменить ход реакции окисления углеводородов в сторону меньшего образования некоторых токсичных компонентов: оксида углерода, углеводородов, альдегидов, сажи и др.

Простейшей присадкой к топливу является вода. В случае применения водно-топливной эмульсии (ВТЭ), за счет явления микровзрыва частиц воды, распыление топлива улучшается, за счет этого его расход снижается на 4,5–7,5 % [44]. При использовании ВТЭ с 15 % воды по массе происходит сокращение выбросов оксидов азота на 40 %. При этом температура ОГ снижается на 20–25 %, головки цилиндра на 10,12 % [44].

Для решения задачи уменьшения дымности дизелей используют антидымные присадки. Большинство из них содержат в своем составе металлы: барий, никель, кобальт, хром, железо, медь, алюминий, цинк и др.

Применение малотоксичных регулировок совместно с добавлением присадок в топливо благотворно влияет на уровень содержания CO, C_xH_y и сажи в ОГ – они сокращаются в 2,5 раза [99].

Есть данные, что выбросы оксидов азота, составляющие в общей токсичности до 92 %, на режиме полной мощности в 1,9 раза превышают нормы. В случае применения присадки SLD фирмы «Лабофина» (Бельгия) они составляют только 0,7 от нормы. Российские ученые совместно с коллегами из нидерландской компании Ай-Си-Ди создали фетерол – высокооктановую добавку к бензину, делающую его соответствующим зарубежным и отечественным санитарным нормам [100].

Применение в качестве добавки к бензинам метилтретичнобутилового эфира снижает содержание в автомобильных выхлопах угарного газа на 10–21 %, несгоревших углеводородов на 5–10 % и вредных летучих соединений на 13–17 % [101]. В настоящее время достаточно эффективно зарекомендовали себя следующие антидымные присадки, содержащие в своем составе барий: «Прадайн-12» (США), «Экосол-Авто» (Нидерланды), «Лубризолб-565» (Франция) и др. В ФРГ есть опыт использования в качестве антидымных присадок солей, содержащих в своем составе до 40 % кальция, водных растворов кобальта, магния и хлора [97].

Перевод дизелей на работу на новом альтернативном топливе (диметиловом эфире) позволяет при сохранении мощностных и экономических показателей на том же уровне, как на дизельном топливе, существенно улучшить экологические характеристики (разработки фирм «Haldor Topsoe A/S» Дания, «AVL List GmbH» Австрия) [102].

1.4.4. Поддержание технического состояния двигателя и его малотоксичные регулировки

Применение индивидуальных регулировок элементов систем питания и зажигания может обеспечить более низкий уровень токсичности при работе двигателей. Основными регулируемыми параметрами, определяющими токсические свойства двигателя, являются состав топливовоздушной смеси и ориентация периода сгорания по времени осуществления рабочего цикла.

Наиболее известным способом воздействия на токсичность ОГ является изменение регулировок угла опережения впрыскивания топлива на дизелях и угла опережения зажигания на двигателях с принудительным воспламенением [103–104].

Регулирование коэффициента избытка воздуха α приводит к изменению состава ОГ. Увеличение коэффициента избытка воздуха приводит к снижению выбросов продуктов неполного сгорания углеводородов и оксида углерода.

Большое влияние на содержание токсических веществ в ОГ оказывает режим работы двигателя. В карбюраторных двигателях максимальные концентрации C_xH_y и CO соответствуют режимам замедления (сброса нагрузки) и холостого хода. Регулировка карбюратора на холостом ходу позволяет снизить концентрацию CO в ОГ до 1–2 % [103]. При таких условиях протекание процесса сгорания резко ухудшается. При увеличении нагрузки условия сгорания улучшаются, и выход токсических компонентов сокращается.

У дизелей сброс нагрузки с точки зрения выброса вредных веществ не представляет никакой проблемы, так как изменение параметров рабочего процесса при этом имеет благоприятный характер. При резком возрастании нагрузки увеличивается цикловая подача топлива до максимальной величины, допускаемой конструкцией и регулировками топливоподающей аппаратуры и не зависящей практически ни от начального, ни от конечного уровня нагрузки. Двигатель, по существу, выходит на режим перегрузки со всеми вытекающими отсюда последствиями: ухудшение смесеобразования, увеличение физической и химической неполноты сгорания топлива и т.д. Все эти явления приводят к увеличению выхода сажи, оксида углерода и других вредных продуктов неполного сгорания топлива. Выход оксидов азота при этом существенно уменьшается [105].

Влияние основных неисправностей дизелей на уровни вредных выбросов и экономичность подробно рассмотрены в работе [90].

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВС

Ухудшающаяся экологическая обстановка окружающей среды за счет значительно возросшего парка автомобилей, в том числе с дизельными двигателями, особенно в крупных мегаполисах, требует принятия срочных эффективных мер по снижению токсичности отработавших газов автомобилей.

Наиболее целесообразным и достаточно эффективным способом снижения вредных выбросов уже находящихся в эксплуатации дизелей является применение каталитических нейтрализаторов в сочетании с одновременной подачей в них воздуха для повышения качества каталитических процессов. Однако использование каталитического нейтрализатора в системе выпуска отработавших газов приводит к заметному (в 1,2–1,4 раза) повышению температуры этих газов, что вредно для атмосферы Земли, и противодействия на выходе, что приводит к ухудшению мощностных и экономических показателей работы ДВС. Наиболее перспективным становится направление по использованию теплоты уходящих газов с целью получения из неё дополнительной работы, что в конечном итоге приведет к повышению суммарной мощности силовой установки и её топливной экономичности и улучшению экологической обстановки окружающей среды.

Задача получения работы из теплоты отработавших газов может быть решена с помощью ряда утилизационных систем, среди которых на автомобильной технике перспективны паросиловые установки и термоэлектрогенераторы, теплоутилизационные системы на базе двигателя Стирлинга. В настоящее время двигатели Стирлинга достигли достаточно высокого технического уровня и могут быть с успехом использованы в качестве установок для улучшения экологической обстановки окружающей среды.

В автомобильных ДВС в мире ежегодно сжигается около 2 млрд т нефтяного топлива. При этом коэффициент полезного действия в среднем составляет 23 %, остальные 77 % уходят на обогрев окружающей среды [26]. В России автотранспорт ежедневно выбрасывает в атмосферу 16,6 млн т загрязняющих веществ [15]. В мегаполисах доля загрязнения воздуха автотранспортом достигает 90–95 % от общего уровня загрязнения [106]. Кроме того, ДВС «сжигают» огромное количество атмосферного кислорода, работа их сопровождается шумом и вибрацией. Два последних фактора не являются предметом рассмотрения в настоящем исследовании, т.к. работа использованного утилизационного двигателя не влияет заметно на эти показатели.

Считается, что основной вред окружающей среде наносят вредные выбросы поршневых ДВС. На рис. 2.1 представлена схема основных, оказывающих негативное влияние воздействий автотранспорта на окружающую среду. На рис. 2.2 схематично приведены виды воздействий автотранспорта на окружающую среду, а на рис. 2.3 – последствия негативного влияния воздействий автотранспорта на различные виды заболеваний людей.

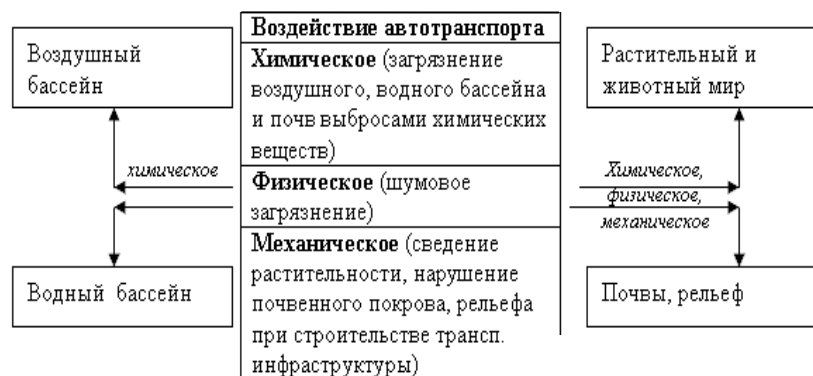


Рис. 2.1. Схема основных воздействий автотранспорта на окружающую среду

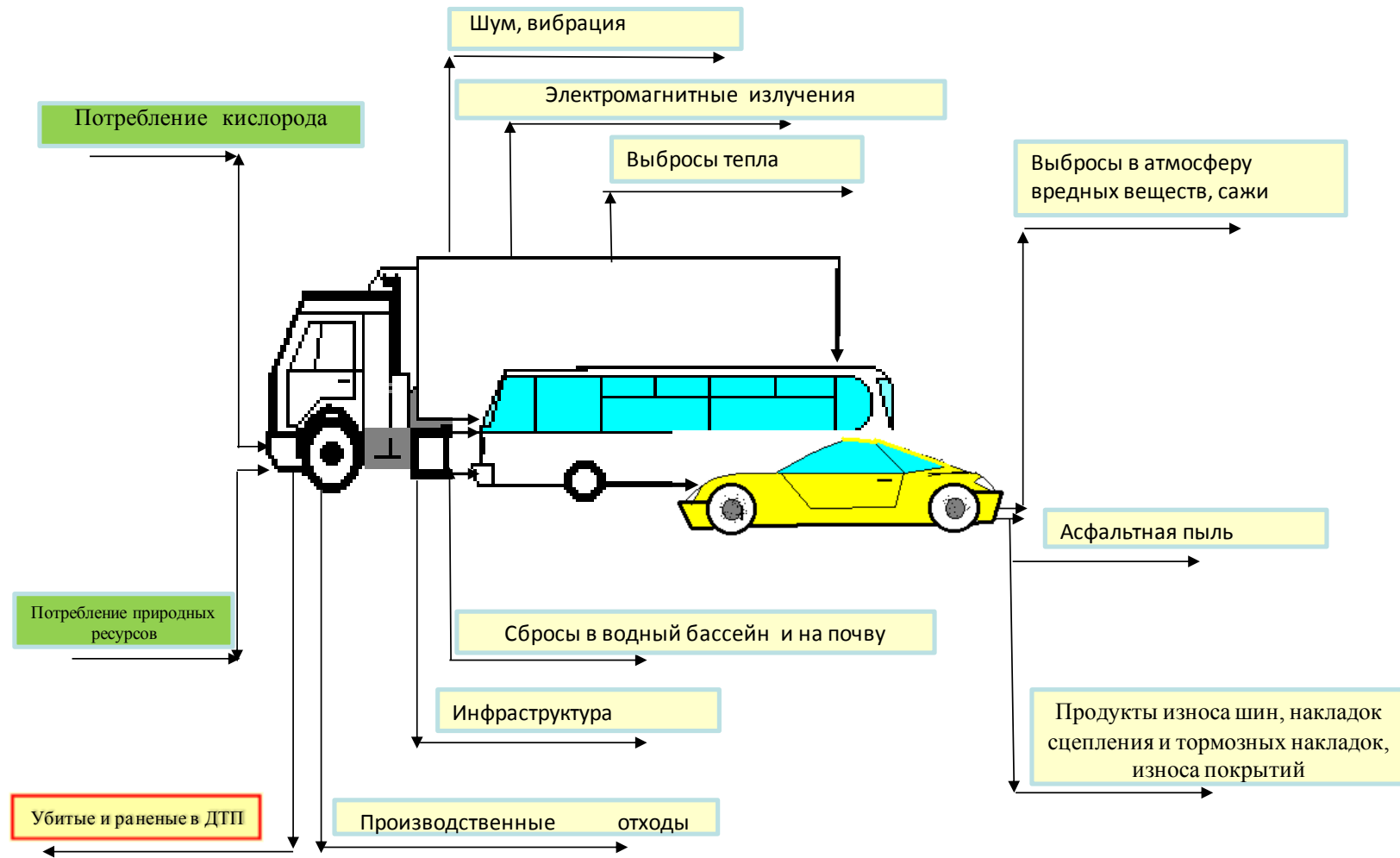


Рис. 2.2. Виды воздействие автотранспорта на окружающую среду

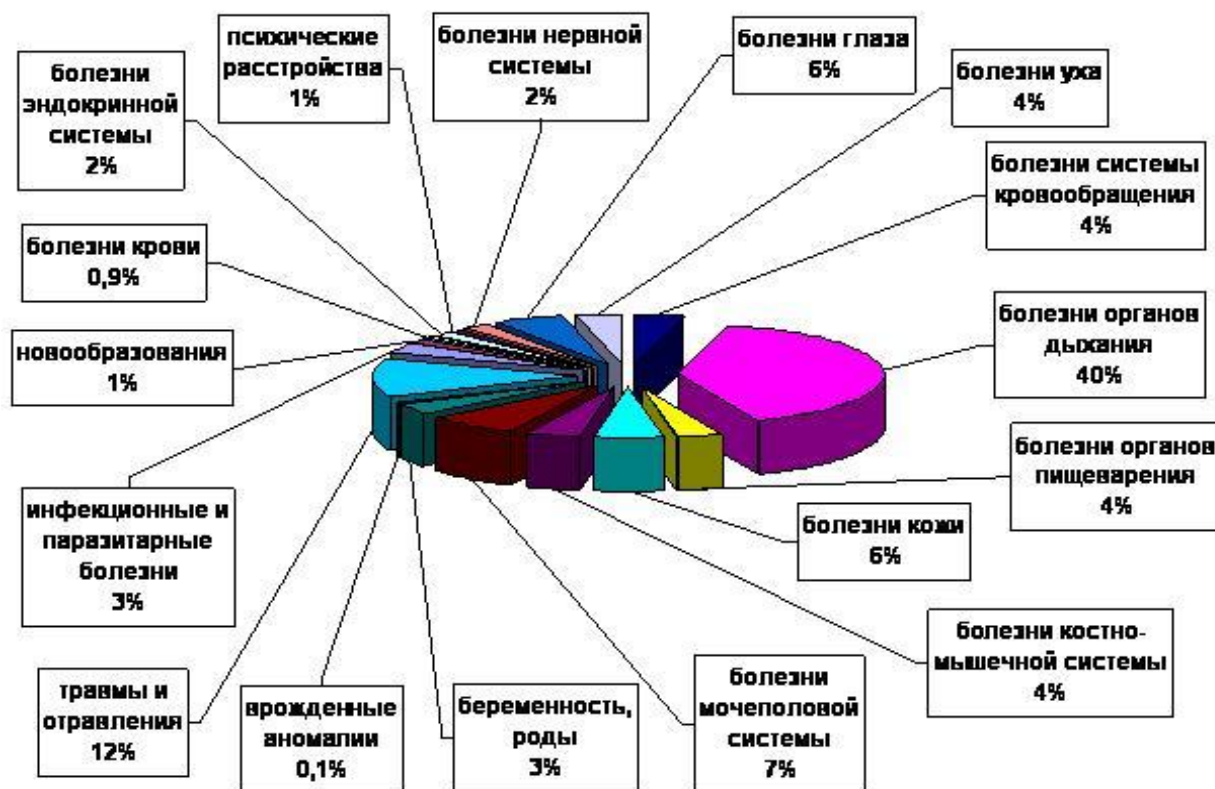


Рис. 2.3. Последствия воздействия автотранспорта на здоровье людей

В рамках разработки базисных принципов концепции индустриально-инновационного развития мегаполиса по снижению вредного воздействия загрязнений атмосферного воздуха на окружающую среду токсичными веществами, выделяемыми промышленными предприятиями и автомобильным транспортом, при выполнении НИР выполнен анализ:

- состава отработавших газов поршневых ДВС как источник экологической опасности;
- нормирование вредного воздействия отработавших газов поршневых ДВС на окружающую среду с учетом регламентированных требований ГОСТ 17.2.2.03-87, ГОСТ 17.2.2.05-97, ГОСТ Р 51249-99, ГОСТ Р 51249-99 и гигиенических нормативов ГН 2.1.6.695-98 и ГН 2.1.6.696-98, отражающих ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест;

– пути снижения вредного воздействия отработавших газов ДВС на окружающую среду за счет совершенствования конструкции ДВС и его систем, обезвреживания отработавших газов с помощью специальных устройств, использования нетрадиционных топлив и применения присадок.

В рамках принципов системного анализа установок двухуровневого использования теплоты рассмотрена техническая система, включающая два контура использования теплоты, одним из которых является поршневой двигатель внутреннего сгорания, а другим – утилизационный двигатель с внешним подводом теплоты и внутренним парообразованием (рис. 2.4). Подобные технические системы называют установками двухуровневого использования теплоты (УДИТ).

Рассматриваемая УДИТ представляет собой единый комплекс разнообразных элементов. В этом комплексе непрерывно осуществляются взаимно связанные физические и химические процессы самой различной природы.

Всякое изменение любого параметра или характеристики любого элемента УДИТ в той или иной степени влияет на параметры, характеристики и показатели всей системы.

Одновременно на работе системы в целом сказывается воздействие внешних факторов – условий эксплуатации УДИТ и условий окружающей среды.

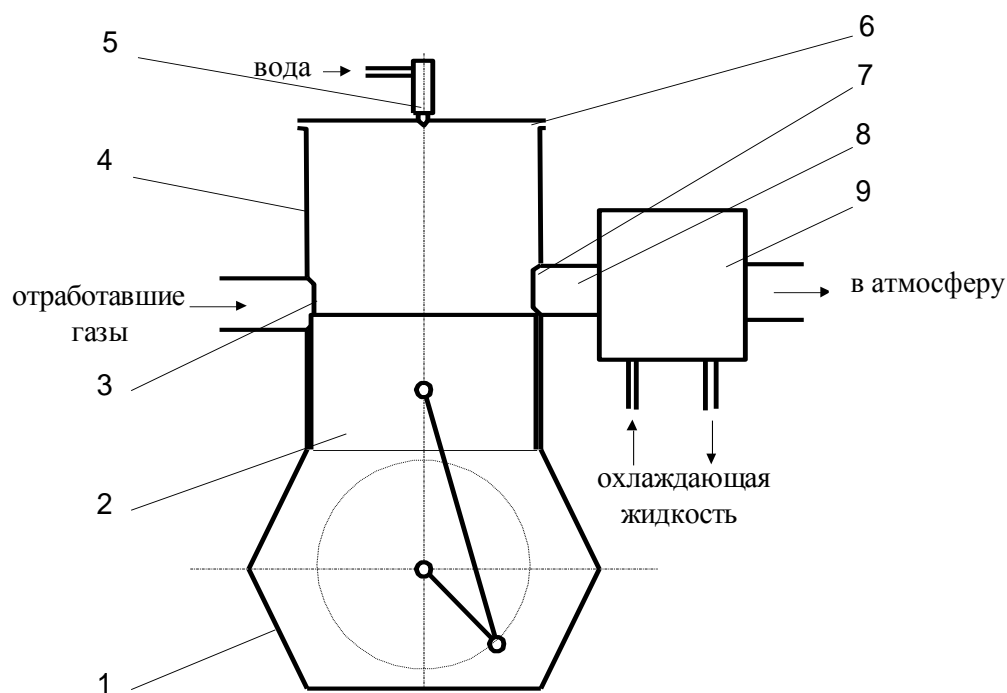


Рис. 2.4. Принципиальная схема утилизационного двигателя с внешним подводом теплоты и внутренним парообразованием:

1 – картер; 2 – поршень; 3 – впускное окно; 4 – цилиндр; 5 – форсунка; 6 – головка; 7 – выпускное окно; 8 – выпускной трубопровод ДВПТВП; 9 – конденсатор

Таким образом, для рассматриваемой системы характерна большая сложность внутренних и внешних связей и в то же время необходим их комплексный учет.

Указанные обстоятельства заставляют при исследовании и оценке качества УДИТ использовать системный подход, цель которого заключается в раскрытии реального механизма функционирования сложных систем, комплексного решения задач их анализа и синтеза.

Анализ УДИТ, рассматриваемого в настоящей работе типа, показывает, что они могут и должны служить предметом системного подхода, так как действительно представляют собой сложные системы, которые, с одной стороны, являются составной частью более сложной системы – мобильного средства, определяющей рамки ее создания и функционирования; с другой – ввиду наличия отдельных контуров УДИТ. Эту систему, в свою очередь, можно рассматривать как сложную совокупность взаимосвязанных подсистем.

Сказанным подтверждается принципиальная возможность и необходимость использования системного подхода при исследовании экологических особенностей работы УДИТ. Обобщая эвристические процедуры системного подхода, можно сформулировать следующие основные этапы исследования процессов, происходящих в УДИТ:

1. Выделение исследуемой системы из более общей. На этом этапе должны быть четко очерчены границы исследуемой системы, установлены ее внешние связи, проведен анализ целей ее создания и функционирования, сформулирована в общем виде задача по изучению системы, а также выбраны соответствующие конкретные критерии ее оценки.

2. Выяснение внутренней структуры исследуемой системы, состава ее подсистем, элементов и видов связей между ними. Цель этого этапа – достижение возможно более отчетливого представления о внутренней структуре и свойствах объектов исследования, т.е. построение иерархии УДИТ.

3. Формулировка задач, решаемых применительно к каждой подсистеме (элементу). Целью этого этапа является распределение по уровням иерархии всего многообразия конкретных задач, которые необходимо решить в процессе анализа УДИТ.

4. Выявление характера взаимодействия отдельных систем в рамках установленной иерархии. Цель этого этапа состоит в определении тех показателей, которые характеризуют взаимодействие каждой системы с другими системами и внешней средой.

5. Проведение систематизирующего ретроспективного анализа и оценка перспективных направлений исследования и создания УДИТ рассматриваемого в настоящей работе профиля.

В соответствии с методологией системного подхода обсуждаемую физико-техническую систему можно представить в виде структурной схемы (рис. 2.5). Выше отмечалось, что УДИТ как система входит в более общие внешние системы. Одной из них является мобильное средство, на котором установлена силовая установка.

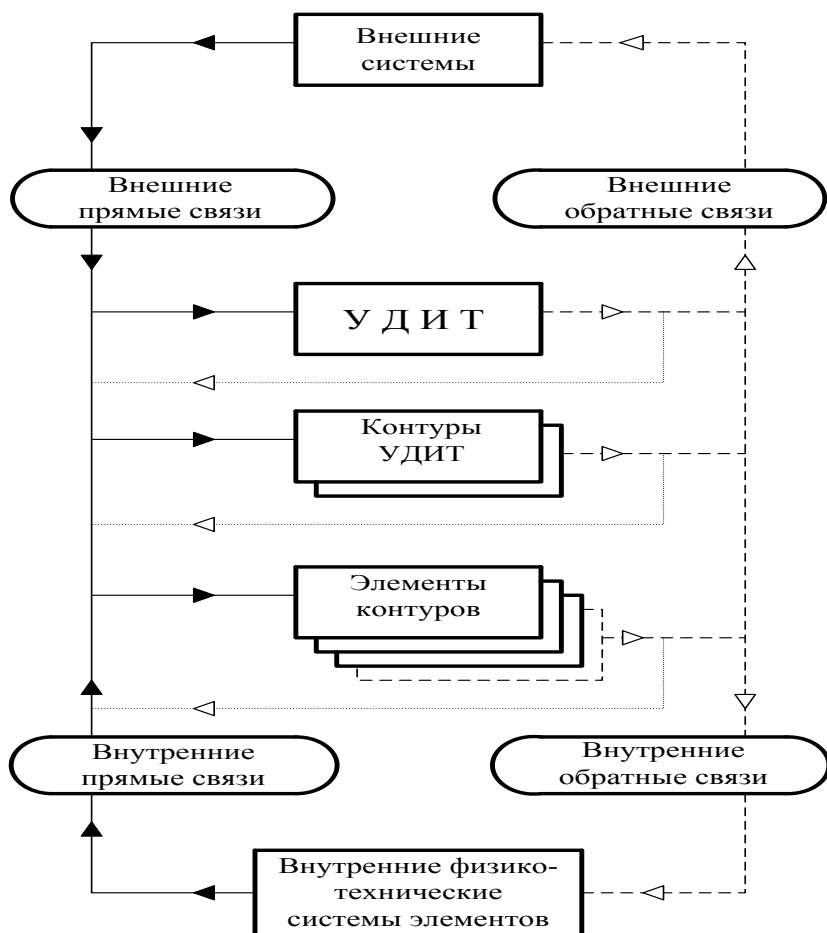


Рис. 2.5. Структура исследуемой системы и схема ее связей

—▶— прямые связи; ---▷--- обратные связи;
▷..... промежуточные связи

УДИТ включает в себя две подсистемы: первичный и вторичный контуры использования теплоты. Каждая из подсистем УДИТ, в свою очередь, состоит из элементов.

Воздействие внешних систем на УДИТ (прямые связи) может проявляться как индивидуально (со стороны отдельной системы), так и комплексно (со стороны двух или более внешних систем одновременно). Так, очевидно, практически только атмосферные условия определяют состояние воздуха, поступающего в УДИТ. Режим же работы, например дизеля, «диктуется» человеком в зависимости от условий эксплуатации мобильного средства.

Следующим шагом при системном подходе должно быть выяснение внутренней структуры исследуемой системы. Представляется, что достаточно адекватное отражение рассматриваемого типа УДИТ может быть получено в виде трехуровневой иерархической модели.

Первый уровень – УДИТ как система с сосредоточенными параметрами, осуществляющая

взаимодействие с внешними системами. На втором иерархическом уровне находятся составляющие УДИТ – первичный и вторичный контуры (ПКИТ и ВКИТ соответственно) использования теплоты (подсистемы). Третий уровень иерархической лестницы составляют элементы ПКИТ и ВКИТ. Между элементами УДИТ существуют внутренние связи, которые так же, как и внешние, разделяются на прямые и обратные.

Прямые связи включают в себя различные воздействия на элементы, обусловленные закономерностями и характером процессов, протекающих внутри отдельных элементов: термодинамическими, химическими и теплофизическими свойствами рабочих тел и теплоносителей; условиями и ограничениями, накладываемыми на параметры и характеристики конструкции. Подобно показателям внешних связей, каждый из показателей внутренних связей оказывает влияние на все элементы УДИТ. Так, изменение какого-либо параметра в одном из элементов непосредственно отразится на его характеристиках. Но одновременно изменятся значения расходных параметров на входе и выходе из этого элемента, экологических показателей, что приведет к изменению балансовых соотношений в других элементах, связанных с этим, и т.д. В итоге возможно изменение термодинамических, расходных и экологических параметров всей УДИТ.

Обратные внутренние связи включают в себя воздействие на внутренние физико-технические системы со стороны систем, стоящих выше на иерархической лестнице. Этими связями определяется направление дальнейшего развития и совершенствования элементов, находящихся на нижестоящих ступенях иерархической лестницы.

Кроме внешних и внутренних в УДИТ как системе имеют место еще и промежуточные связи, которые проявляются во взаимном воздействии систем различного иерархического уровня друг на друга.

Таковы общие принципы системного подхода к изучению и оценке работы установок двух-уровневого использования теплоты. На рис. 2.6 показаны связи рассматриваемой системы на первом и втором иерархическом уровнях, иллюстрирующие соответствующие взаимодействия с точки зрения экологических особенностей УДИТ.

Первый иерархический уровень включает в себя внешние связи УДИТ, рассматриваемой как нечто целое, как единый комплекс, состоящий из разнообразных элементов.

Прямые внешние связи обеспечивают УДИТ топливом (обладающим определенной энергетической ценностью) и воздухом из атмосферы для сжигания этого топлива. Режим потребления топлива и воздуха, в свою очередь, обусловлен условиями эксплуатации установки и действиями оператора, управляющего ею. Обратные экологические внешние связи представлены потоками теплоты, передаваемой в окружающую среду с поверхностей дизеля и утилизационного двигателя, с ОГ, а также выбросами токсичных веществ. Сюда же следует отнести шум и вибрации, создаваемые работающей УДИТ.

Взаимосвязи между первичным и вторичным контурами использования теплоты (второй иерархический уровень) представлены прямой связью дизеля с утилизационным двигателем посредством передачи от первого ко второму отработавших газов ($ОГ^Д$), с термическим потенциалом $Q_{ОГ^Д}$ и содержащих токсичные компоненты – вредные вещества $ВВ_{ОГ^Д}$. Обратные связи заключаются в передаче вырабатываемой утилизационным двигателем мощности ($Ne^{ВКИТ}$) дизелю. Эта дополнительно произведенная работа имеет непосредственное отношение к экологии, так как позволяет на соответствующую величину снизить мощность, вырабатываемую ПКИТ, при неизменной общей мощности силовой установки (включающей дизель и утилизационный двигатель), что обуславливает снижение расхода топлива УДИТ и, соответственно, атмосферного воздуха.

Третий иерархический уровень отражает взаимосвязи экологического характера внутри контуров использования теплоты.

Процессы, происходящие в первичном контуре использования теплоты (ПКИТ), связанные с его экологическими характеристиками, чрезвычайно сложны. Они достаточно всесторонне и глубоко изучены многими исследователями как с качественной, так и с количественной точек зрения. Схематичное описание соответствующих взаимосвязей внутри ПКИТ представлено на рис. 2.7.

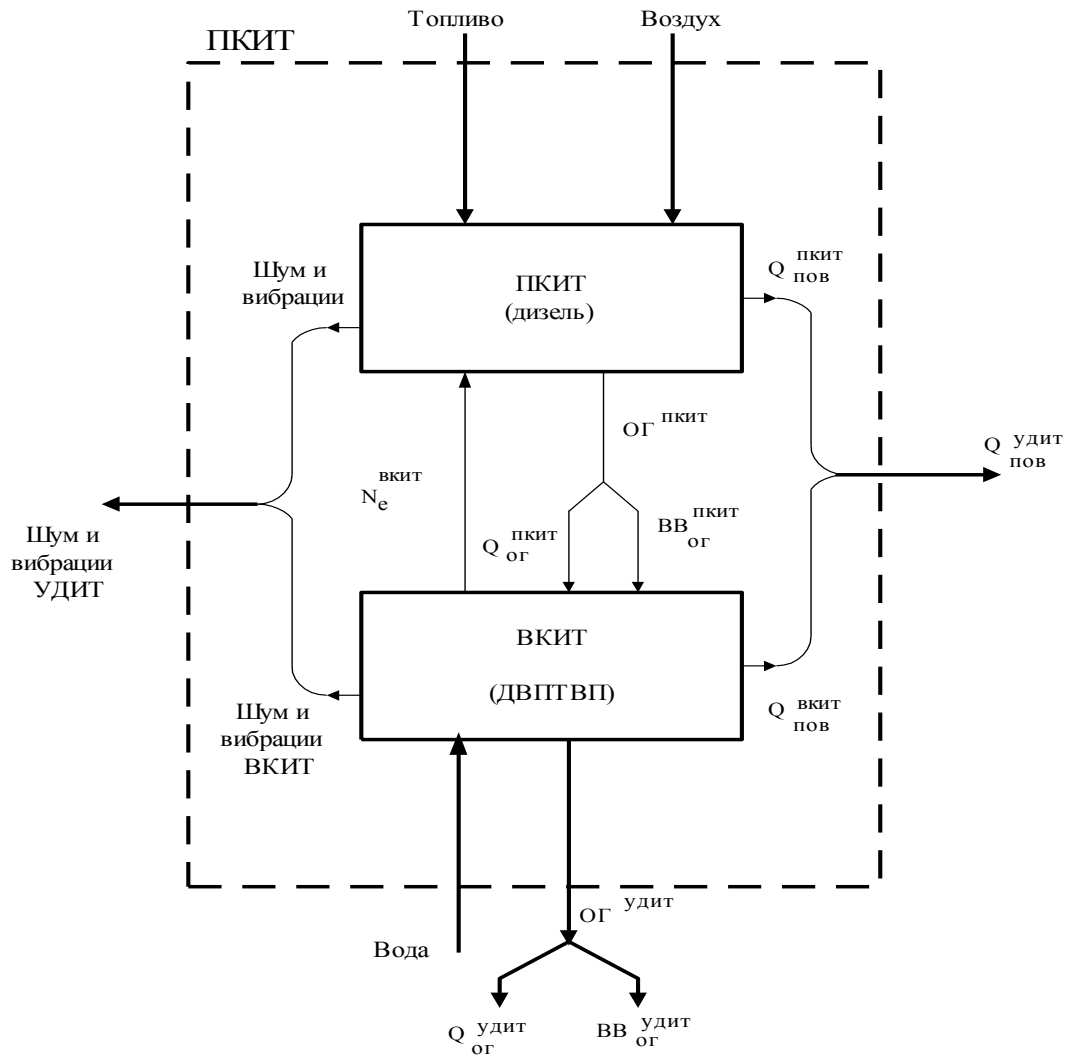


Рис. 2.6. Схема экологических связей исследуемой установки двухуровневого использования теплоты на первом и втором иерархических уровнях

Прямые связи первичного контура использования теплоты представлены на схеме потребляемыми материальными потоками топлива и воздуха из окружающей среды, а также энергетическим потоком – мощностью, подводимой от вторичного контура использования теплоты. Обратные связи обусловлены выделением в окружающую среду шума, вибрации и энергии в форме теплоты с поверхности элементов ПКИТ, а также энергии, уносимой с ОГ во вторичный контур. К ним же относится материальный поток (продукты сгорания), содержащий токсичные вещества.

Приведенные на рис. 2.7 промежуточные связи между элементами ПКИТ очевидны и не требуют специальных пояснений. Следует отметить лишь, что мощность, вводимая в ПКИТ от вторичного контура, отнесена к экологическим связям потому, что она может быть использована для привода механизмов и систем дизеля (компрессора, генератора, вентилятора системы охлаждения и т.п.), «разгружая» тем самым его и позволяя дизелю вырабатывать соответственно меньшую мощность, что обуславливает снижение расхода топлива и атмосферного воздуха, т.е. решает чисто экологическую задачу. Внешние прямые связи экологического характера вторичного контура использования теплоты представлены потоками отработавших газов (ОГ), поступающих из первичного контура, и воды (в случае, если не используется ее возврат из конденсатора) (рис. 2.8).

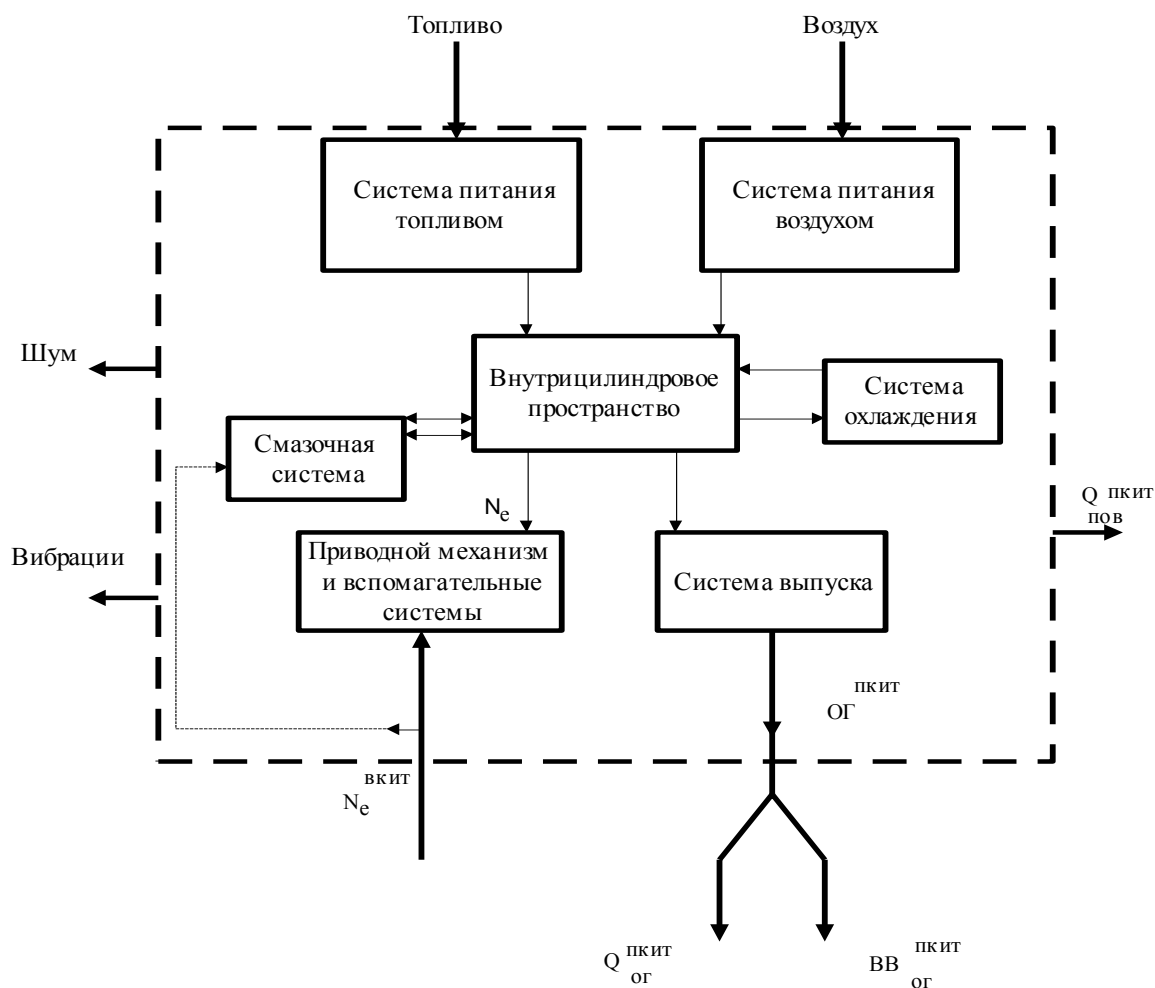


Рис. 2.7. Схема экологических связей ПКИТ (третий иерархический уровень УДИТ)

Обратные связи обусловлены выделением в окружающую среду шума, вибрации, энергии в форме теплоты с поверхностей элементов вторичного контура использования тепла (ВКИТ), энергии, уносимой из него с (ОГ) и энергии, передаваемой в ПКИТ в качестве выработанной утилизационным двигателем мощности. К обратным внешним экологическим связям вторичного контура относится и материальный поток (продукты сгорания), содержащий токсичные вещества.

Внутренние связи во вторичном контуре принципиально очевидны и представлены подачей воды во внутрицилиндровое пространство с помощью системы питания, а также возвратом конденсата воды из конденсатора в систему питания. Однако, в отличие от первичного контура, качественные и количественные характеристики этих взаимосвязей в ДВПТВП, естественно, не изучались ранее. В этом плане представляет интерес экскурс на четвертый иерархический уровень – на уровень процессов, происходящих внутри элементов, составляющих ВКИТ, и в частности во внутрицилиндровом пространстве ДВПДВП, куда поступают ОГ ПДВС. Там эти газы сжимаются, и в них впрыскивается вода. Расчеты показывают, что температура в конце сжатия может достигать 1 500 °С и более. Распыленная вода в этих условиях интенсивно испаряется, рабочее тело расширяется, производя полезную работу. Как отмечалось ранее, эта дополнительно произведенная работа имеет непосредственное отношение к экологии, так как позволяет на соответствующую величину снизить мощность, вырабатываемую ПКИТ, при неизменной общей мощности силовой установки (включающей дизель и утилизационный двигатель), что обуславливает снижение расхода топлива УДИТ и, соответственно, атмосферного воздуха. Чрезвычайно важным является то, что при указанной выше температуре компоненты парогазовой смеси, находящиеся в цилиндре УД, после впрыскивания в него воды претерпевают сложные химические изменения.

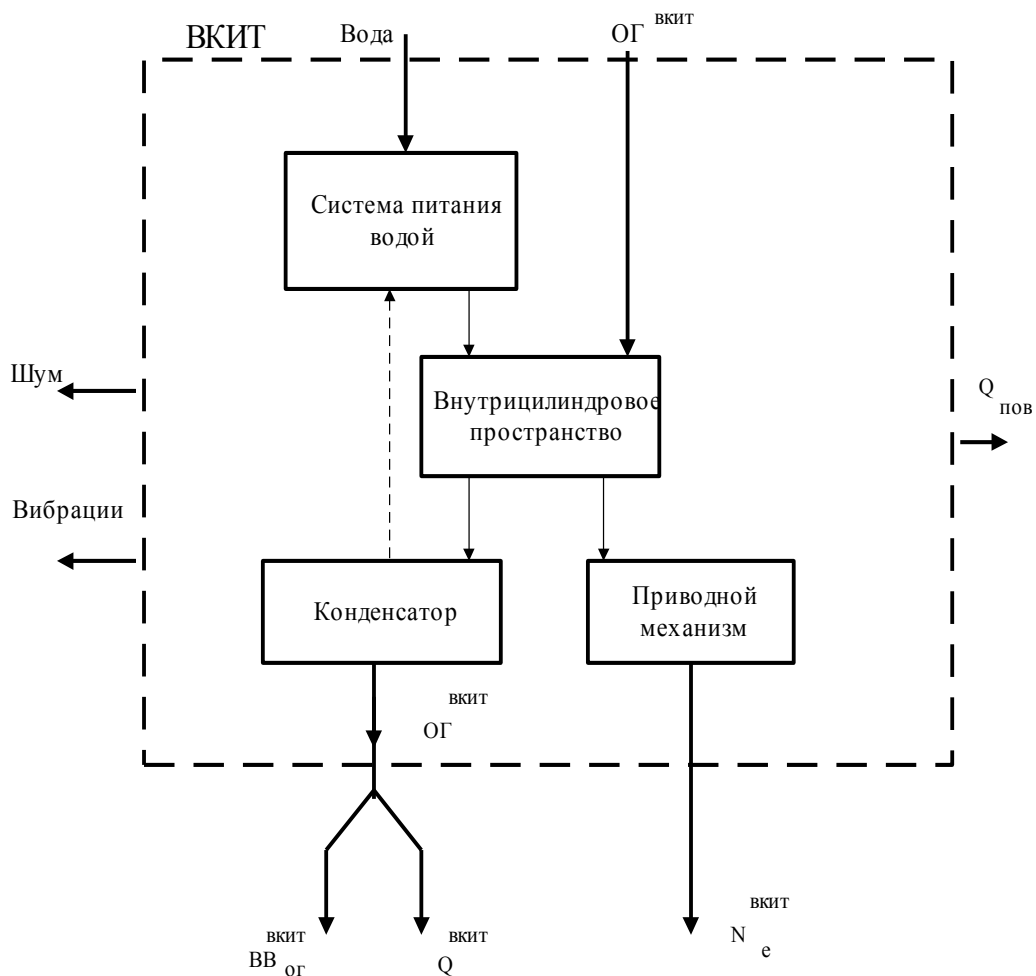


Рис. 2.8. Схема экологических связей ПКИТ

Имеющиеся литературные данные позволяют предположить возможность протекания ряда процессов радикального характера. При исследовании работы ПКИТ по внешней скоростной характеристике экспериментально определены значения характеристик токсичности ОГ до и после УД при частотах вращения коленчатого вала 1 000, 1 400, 1 800, 2 200 и 2 600 мин⁻¹ (рис. 2.9 соответственно сплошные и пунктирные линии). С использованием уравнений регрессии [106] определены степени снижения: расхода воздуха и топлива УДИТ (рис. 2.10); теплового «загрязнения» окружающей среды, диссипации эксергии при выбросе ОГ, а также значения коэффициента экологической безопасности УДИТ (рис. 2.11). На основе результатов этих расчетов были получены значения перечисленных показателей при работе УДИТ, т.е. с учетом утилизации теплоты ОГ ПКИТ (рис. 2.12, пунктирные линии).

Дымность выбросов в атмосферу при утилизации теплоты ОГ дизеля с помощью ДВПТВП снижается с 0,247 (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$), 0,227 (при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$) и 0,317 (при $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$) г/м³ до 0,154, ..., 0,167 и 0,246 г/м³ соответственно или на 37,7; 26,4 и 22,1 %. Как видно, наиболее существенно эффект нейтрализации проявляется на малых частотах вращения коленчатого вала дизеля (ПКИТ). Обусловлено это, очевидно, тем, что основной причиной обсуждаемого эффекта является «связывание» твердых частиц водяным паром и последующим «выносом» их из потока отработавших газов вместе с конденсатом. Цикловая же подача воды при снятии внешней скоростной характеристики ПКИТ оставалась неизменной.

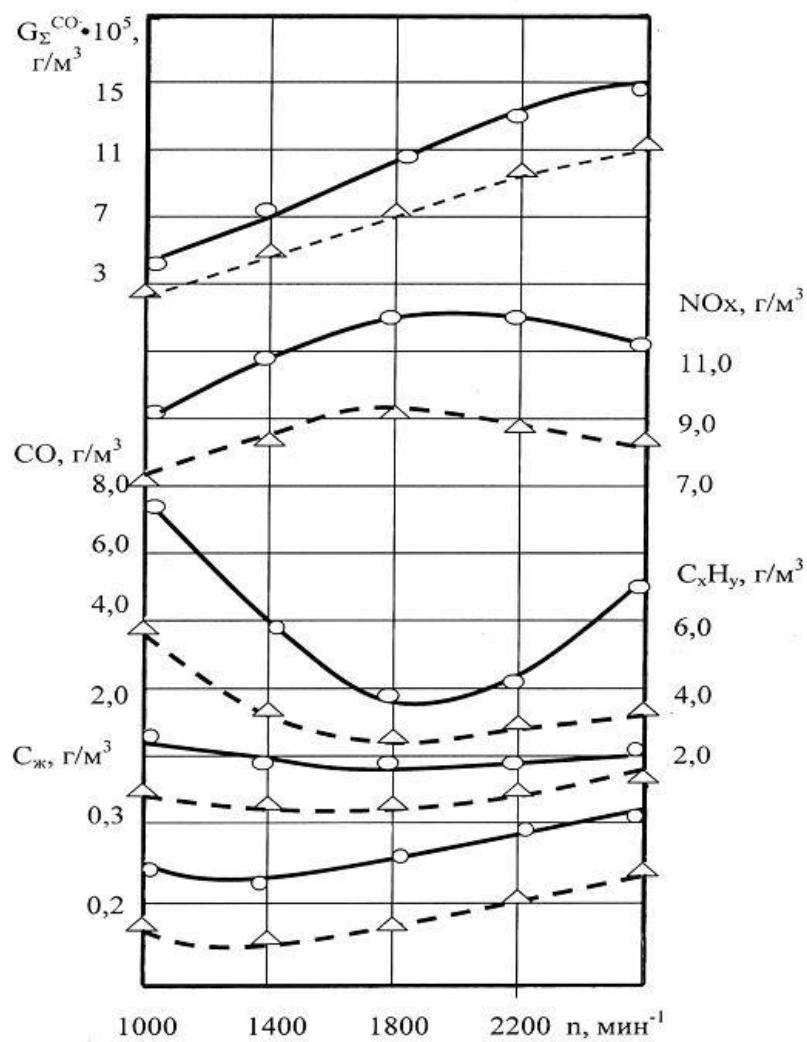


Рис. 2.9. Изменение концентрации токсичных компонентов в отработавших газах дизеля КамАЗ-740 при работе по внешней скоростной характеристике:
 ○ – без утилизации теплоты отработавших газов;
 Δ – при утилизации теплоты отработавших газов

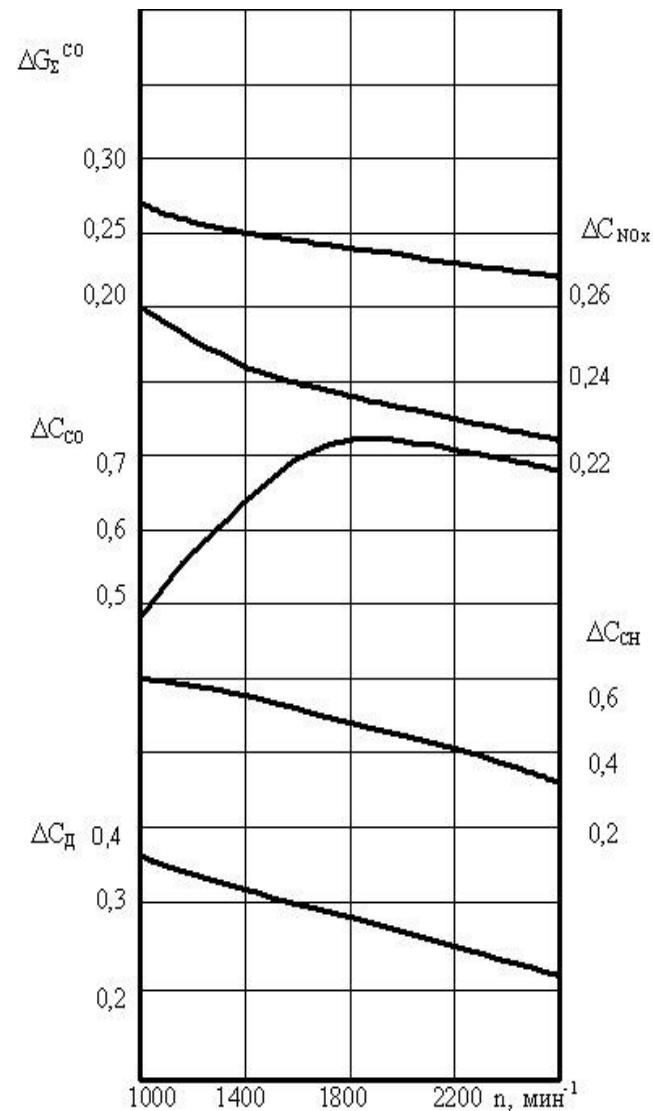


Рис. 2.10. Изменение степеней снижения содержания токсичных компонентов в отработавших газах дизеля КамАЗ-740 при работе по внешней скоростной характеристике

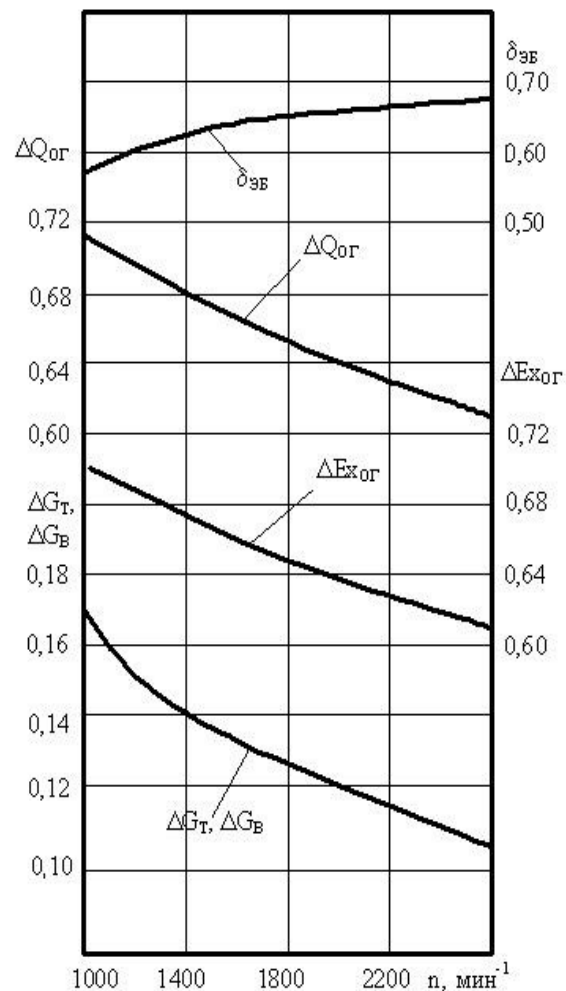


Рис. 2.11. Изменение степеней снижения расходов топлива и воздуха, теплового «загрязнения» окружающей среды, диссипации эксергии, коэффициента экологической безопасности при выбросе ОГ дизеля КамАЗ-740 при его работе по внешней скоростной характеристике

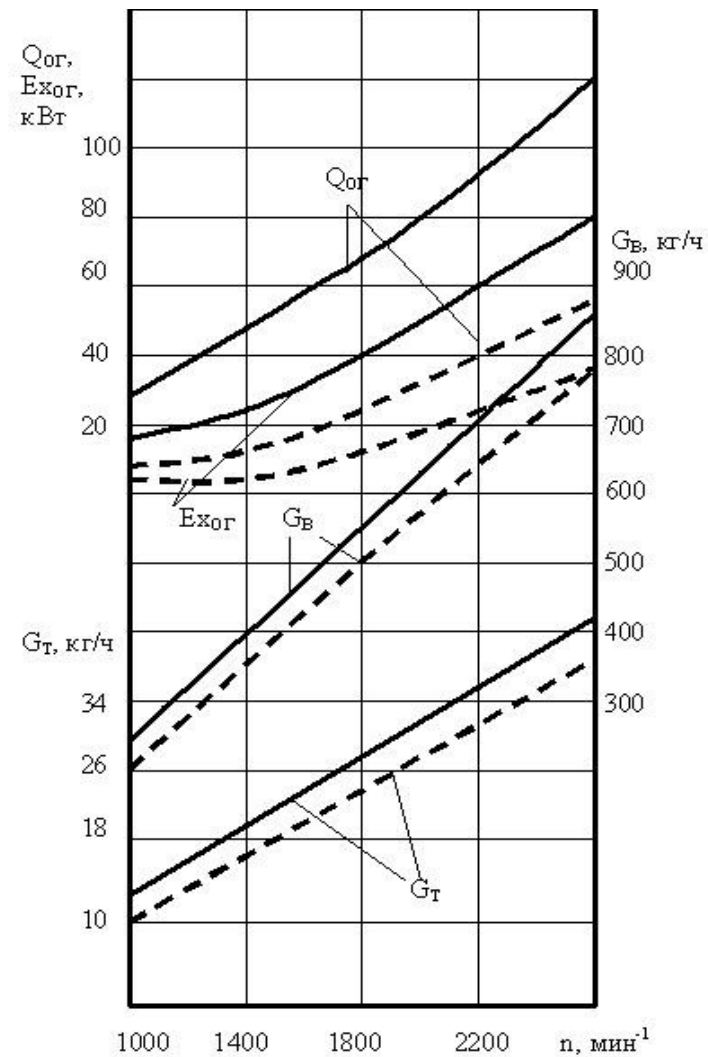


Рис. 2.12. Изменение показателей экологической безопасности дизеля КамАЗ-740 при работе по внешней скоростной характеристике:
 ----- — без утилизации теплоты отработавших газов;
 - - - - - — при утилизации теплоты отработавших газов

С увеличением содержания сажи в ОГ дизеля степень снижения дымности (рис. 2.10) монотонно уменьшается (по 0,7 % на каждые 100 мин^{-1}).

Приведенное объяснение подтверждается и результатами проведенного химического анализа конденсата, в которых практически не отмечалось изменения содержания твердых частиц в пробах, полученных при различных частотах вращения коленчатого вала дизеля.

Содержание углеводородов в ОГ дизеля до ДВПТВП, составлявшее 2,67 (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$), 1,60 (при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$) и 1,87 (при $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$) г/м^3 , снижается после утилизатора до 1,07, ..., 0,80 и 1,33 г/м^3 соответственно, или на 59,9; 50,0 и 28,9 %. Интенсивность уменьшения степени снижения содержания углеводородов в выбросах УДИТ по сравнению с их количеством в ОГ дизеля составила в среднем 1,9 % на каждые 100 мин^{-1} , причем, в области низких частот вращения коленчатого вала эффект нейтрализации проявился более ощутимо (рис. 2.10). Этот факт связан с неизменностью цикловой подачи воды в цилиндр УД в условиях увеличения содержания углеводородов, поступающего во ВКИТ рабочего тела.

Выбросы оксида углерода CO с 7,6 (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$), 2,0 (при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$) и 4,93 (при $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$) г/м^3 перед УД после утилизатора снижаются соответственно до 4,03–0,57 и 1,61 г/м^3 или на 47,4; 71,5 и 67,5 %. Отмечающаяся меньшая интенсивность «доокисления» оксида углерода при меньших частотах вращения коленчатого вала дизеля связана с более низкими температурами в области протекания химических реакций.

Содержание соединений азота – оксидов NO_x в ОГ дизеля до ДВПТВП, составлявшее 9,3 (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$), ..., 11,8 (при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$) и 10,60 (при $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$) г/м^3 , снижается после утилизатора до 7,00; 9,00 и 8,20 г/м^3 соответственно, или на 26,0; 23,7 и 22,0 %. Интенсивность практически монотонного уменьшения степени снижения содержания оксидов азота в выбросах УДИТ по сравнению с их количеством в ОГ дизеля составила в среднем 0,25 % на каждые 100 мин^{-1} (рис. 2.10).

Природа установленной тенденции связана, очевидно, с теми же причинами, что и в случае с изменением дымности ОГ. Оксиды азота в результате реакции с водяными парами образуют азотную и азотистую кислоты и «выносятся» из потока отработавших газов вместе с конденсатом. Цикловая же подача воды при снятии внешней скоростной характеристики ПКИТ оставалась неизменной. Приведенное объяснение подтверждается и результатами химического анализа конденсата, в процессе которого практически не отмечалось изменения содержания азотной и азотистой кислот в пробах, взятых при различных частотах вращения коленчатого вала дизеля. Так комплексный показатель вредности выбросов УДИТ составил 4,60 (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$); 10,72 (при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$) и 14,73 (при $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$) г/ч , в то время как после ПКИТ он равнялся 3,36, 6,32 и 11,53 г/ч соответственно, т.е. вредность выбросов уменьшилась на 27,0, 24,0 и 22,0 %. Интенсивность монотонного снижения вредности выбросов УДИТ по сравнению с ОГ дизеля составила в среднем 0,31 % на каждые 100 мин^{-1} (рис. 2.10).

После исследования изменения показателей токсичности ОГ УДИТ при работе ПКИТ по внешней скоростной характеристике было изучено поведение остальных показателей экологической безопасности на этих же режимах. Прежде всего были экспериментально определены часовые расходы топлива и воздуха, величины теплового «загрязнения» и диссипации эксергии за счет выбрасываемых ОГ дизеля КамАЗ-740 (рис. 2.12, сплошные линии). Затем с использованием математической модели (системы соответствующих полиномиальных уравнений) [107] были оценены изменения степеней снижения величин теплового «загрязнения» и диссипации эксергии за счет выброса ОГ (рис. 2.11). С помощью регрессионных уравнений [106] определены также степени снижения расходов топлива и воздуха (рис. 2.11). Используя значения ΔG_T и ΔG_B , были рассчитаны расходы топлива и воздуха при установке в выпускную систему дизеля КамАЗ-740 утилизатора (рис. 2.12, пунктирные линии).

Результаты экспериментов и расчетов позволяет сделать следующие выводы.

Расход топлива при работе дизеля без УД, составлявший 12,6 (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$), 26,4 (при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$) и 39,8 (при $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$) кг/ч , снижается в результате утилизации теплоты ОГ

до 10,4–22,9 и 35,8 кг/ч соответственно или на 17,5; 12,6 и 10,7 %. Интенсивность уменьшения расхода топлива УДИТ по сравнению с дизелем КамАЗ-740 составила в среднем 0,43 % на каждые 100 мин⁻¹.

Расход воздуха при работе дизеля без УД, составлявший 223 (при $n = 1\ 000$ мин⁻¹), 582 (при $n = 1\ 800$ мин⁻¹) и 881 (при $n = 2\ 600$ мин⁻¹) кг/ч, снижается в результате утилизации теплоты ОГ до 184, ..., 509 и 787 кг/ч соответственно или на 17,5; 12,6 и 10,7 %, поскольку интенсивность снижения расхода воздуха УДИТ по сравнению с дизелем КамАЗ-740 совпадает с таковой в отношении топлива, объяснение чего вполне понятно из методики определения обсуждаемых величин.

Величина теплового «загрязнения» атмосферы ОГ дизеля до ДВПТВП, имевшая значения 30,1 (при $n = 1\ 000$ мин⁻¹), 70,3 (при $n = 1\ 800$ мин⁻¹) и 122,2 (при $n = 2\ 600$ мин⁻¹) кВт, уменьшается после утилизатора до 6,3–23,8 и 47,2 кВт соответственно или на 79,2; 66,2 и 61,3 %. Интенсивность уменьшения степени теплового «загрязнения» выбросов УДИТ по сравнению с его количеством в ОГ дизеля составила в среднем 1,12 % на каждые 100 мин⁻¹.

Диссипация эксергии за счет выбрасываемых в окружающую среду ОГ с 17,1 (при $n = 1\ 000$ мин⁻¹) – 42,7 (при $n = 1\ 800$ мин⁻¹) и 79,9 (при $n = 2\ 600$ мин⁻¹) кВт перед УД уменьшается после утилизатора до 4,5, ..., 15,1 и 31,7 кВт соответственно или на 73,5, 64,7 и 60,3 %. Интенсивность уменьшения степени диссипация эксергии с выбросами УДИТ по сравнению с ее количеством в ОГ дизеля составила в среднем 0,83 % на каждые 100 мин⁻¹.

Коэффициент экологической безопасности (КЭБ) равен 0,58 (при $n = 1\ 000$ мин⁻¹), 0,65 (при $n = 1\ 800$ мин⁻¹) и 0,68 (при $n = 2\ 600$ мин⁻¹). Таким образом, с ростом частоты вращения коленчатого вала наблюдается рост экологической безопасности двигателя. Исследование показателей экологической безопасности УДИТ при работе первичного контура использования теплоты по нагрузочной характеристике ($n = 1\ 600$ мин⁻¹) проводилось в том же порядке, что и при определении скоростной характеристики.

Полученные экспериментально на различных нагрузках значения концентрации в ОГ оксида углерода, углеводородов, оксидов азота, сажи и комплексного показателя вредности выбросов ПКИТ показаны на рис. 2.13 сплошными линиями.

Одновременно были экспериментально определены значения перечисленных выше характеристик токсичности ОГ и после УД при среднем эффективном давлении 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 и 0,7 МПа (рис. 2.13, точки у соответствующих пунктирных линий). Затем с помощью соответствующих уравнений регрессии [110] было рассчитано изменение величин степеней снижения: концентрации оксида углерода; концентрации углеводородов; концентрации оксидов азота и комплексного показателя вредности выбросов двигателя при работе дизеля по нагрузочной характеристике (рис. 2.14) и рассчитаны величины соответствующих показателей токсичности при работе УДИТ (рис. 2.13 пунктирные линии).

Анализ результатов экспериментов и расчетов, представленных на рис. 2.13–2.14, позволяет сделать следующие выводы.

Дымность выбросов в атмосферу при утилизации теплоты ОГ дизеля в ДВПТВП уменьшается с 0,01 (при $p_e = 0,1$ МПа), ..., 0,04 (при $p_e = 0,5$ МПа) и 0,31 (при $p_e = 0,7$ МПа) г/м³ до 0,01, ..., 0,02 и 0,21 г/м³ соответственно или на 98,1; 42,0 и 29,5 %. Наиболее существенно эффект нейтрализации проявляется на малых нагрузках, что вызвано природой обсуждаемого эффекта – «связыванием» твердых частиц водяным паром и последующим «выносом» их из потока отработавших газов вместе с конденсатом. Цикловая же подача воды при снятии нагрузочной характеристики ПКИТ оставалась неизменной. Поэтому с увеличением содержания сажи в ОГ дизеля степень снижения дымности (рис. 2.14) монотонно уменьшалась (в среднем по 11,4 % на каждые 0,1 МПа).

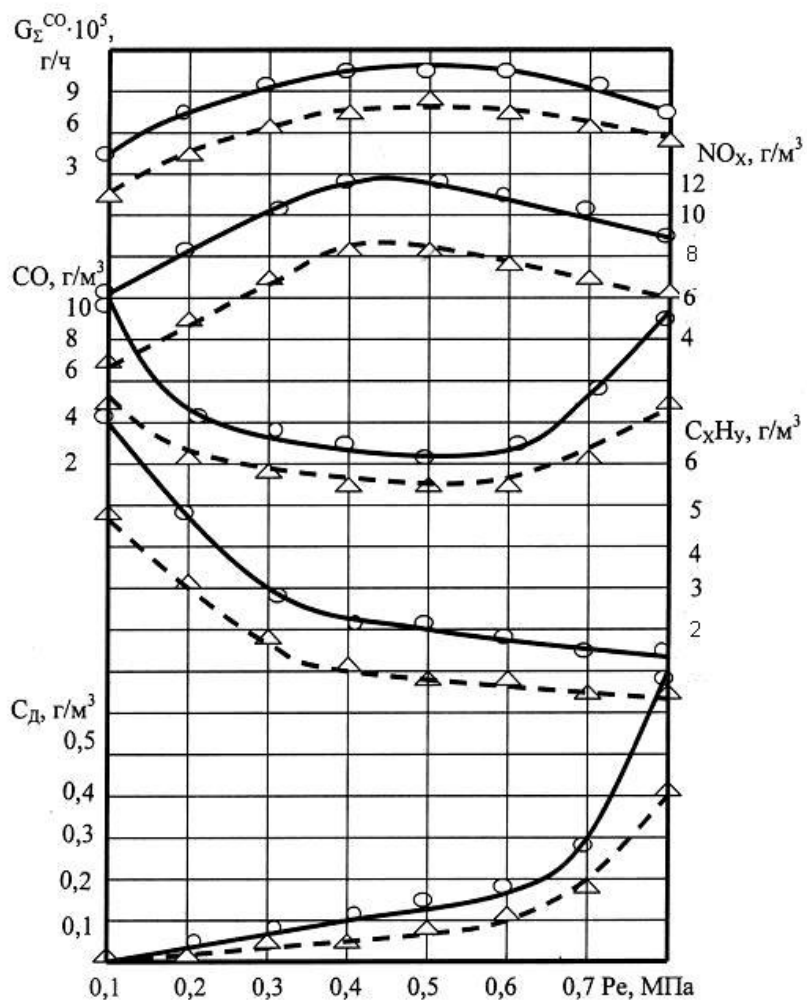


Рис. 2.13. Изменение концентрации токсичных компонентов в отработавших газах дизеля КамАЗ-740 при работе по нагрузочной характеристике: -----○----- — без утилизации теплоты отработавших газов (эксперимент); □ — при утилизации теплоты отработавших газов (эксперимент); — — — — — при утилизации теплоты отработавших газов (расчет)

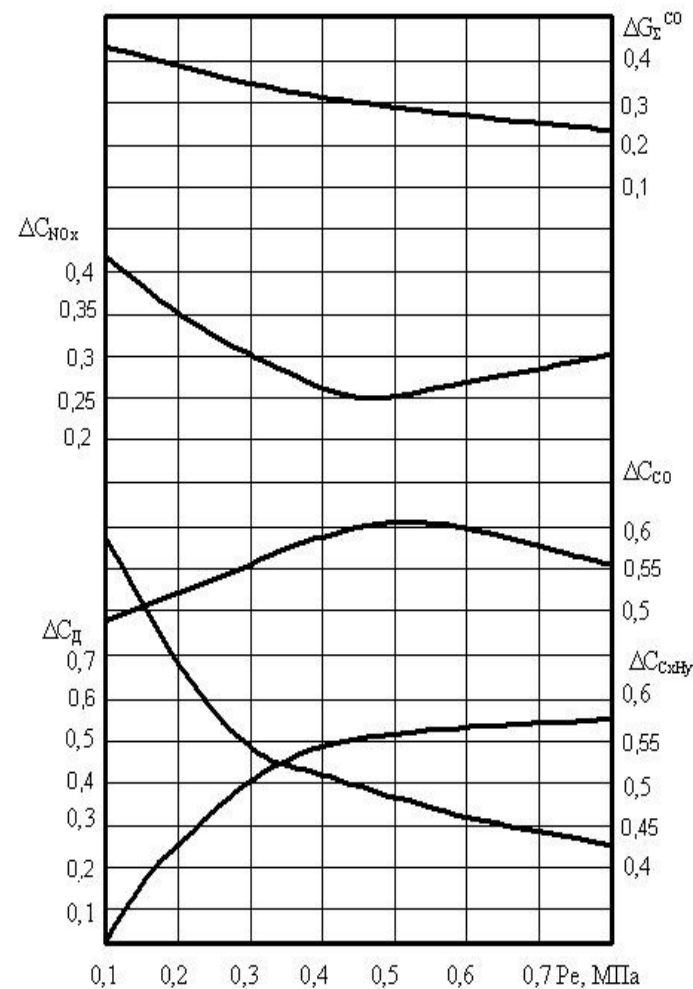


Рис. 2.14. Изменение степеней снижения содержания токсичных компонентов в отработавших газах дизеля КамАЗ-740 при работе по нагрузочной характеристике

Содержание углеводородов (CO , CO_2 и др.) в ОГ дизеля до ДВПТВП, составлявшее 7,0 (при $p_e = 0,1$ МПа), ..., 2,2 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 1,4 (при $p_e = 0,7$ МПа) г/м^3 уменьшается после утилизатора до 4,9, ..., 1,0 и 0,59 г/м^3 соответственно или на 32,1; 54,8 и 57,5 %. В области нагрузок 0,1–0,4 МПа эффект нейтрализации проявляется наиболее ощутимо, а затем интенсивность уменьшения степени снижения содержания углеводородов в выбросах УДИТ по сравнению с их количеством в ОГ дизеля меняется незначительно (рис. 2.14). Этот факт, очевидно, связан с неизменностью цикловой подачи воды в цилиндр УД в условиях увеличения содержания углеводородов, поступающих во ВКИТ рабочего тела.

Содержание оксида углерода CO в ОГ уменьшается с 10,5 (при $p_e = 0,1$ МПа), ..., 2,3 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 5,4 (при $p_e = 0,7$ МПа) г/м^3 перед ДВПТВП до 5,5, ..., 0,9 и 2,3 г/м^3 соответственно или на 32,1; 54,8 и 57,5 % после утилизатора. Отмечающаяся меньшая интенсивность «доокисления» оксида углерода при меньших нагрузках может быть связана с более низкими температурами в области протекания химических реакций.

Содержание оксидов азота в ОГ дизеля до ДВПТВП, составлявшее 5,7 (при $p_e = 0,1$ МПа), 11,2 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 10,5 (при $p_e = 0,7$ МПа) г/м^3 уменьшается после утилизатора до 3,5; 3,0 и 7,6 г/м^3 соответственно или на 42,5; 27,6 и 27,7 %. Интенсивность уменьшения степени снижения содержания оксидов азота в выбросах УДИТ по сравнению с их количеством в ОГ дизеля от $p_e = 0,1$ МПа до $p_e = 0,55$ МПа составила в среднем 3,89 % на каждые 0,1 МПа. Затем она незначительно (на 1,6 %) увеличивается (рис. 2.14).

Природа установленной тенденции связана, очевидно, с теми же причинами, что и в случае с изменением дымности ОГ. Оксиды азота в результате реакции с водяными парами образуют азотную и азотистую кислоты и «выносятся» из потока отработавших газов вместе с конденсатом. Цикловая же подача воды при снятии нагрузочной характеристики ПКИТ оставалась неизменной.

Приведенное объяснение подтверждается и результатами химического анализа конденсата, в процессе которого практически не отмечалось изменения содержания азотной и азотистой кислот в пробах, взятых при различных нагрузках. Комплексный показатель вредности выбросов УДИТ равнялся 2,86 (при $p_e = 0,1$ МПа), 6,5 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 7,08 (при $p_e = 0,7$ МПа) г/м^3 , в то время как до утилизационного двигателя величины этого показателя составляли соответственно 5,1; 10,8 и 9,5 г/м^3 , т.е. имело место уменьшение вредности выбросов соответственно на 44,0; 39,8 и 25,5 %. Интенсивность практически монотонного уменьшения вредности выбросов УДИТ по сравнению с ОГ дизеля составила в среднем 3,08 % на каждые 0,1 МПа (рис. 2.14).

На рис. 2.15 и рис. 2.16 приведены результаты, полученные при работе ПКИТ по нагрузочной характеристике, касающиеся расходов топлива и воздуха, теплового «загрязнения» окружающей среды, диссипации эксергии при выбросе отработавших газов в атмосферу и КЭБ УДИТ. При этом в соответствие с методикой экспериментов значения перечисленных выше показателей определялись экспериментально на выходе из дизеля (до УД), а на выходе из УДИТ рассчитывались с использованием соответствующих уравнений регрессии [106].

Расход топлива при работе дизеля без УД, составлявший 10 (при $p_e = 0,1$ МПа), 16 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 35 (при $p_e = 0,7$ МПа) кг/ч , уменьшается в результате утилизации теплоты ОГ до 6,5, ..., 13 и 30 кг/ч соответственно или на 30, 19 и 14 %. Интенсивность уменьшения расхода топлива УДИТ по сравнению с дизелем КамАЗ-740 составила в среднем 0,43 % на каждые 100 мин⁻¹.

Расход воздуха при работе дизеля без УД, составлявший 640 кг/ч во всем диапазоне нагрузки, уменьшается в результате утилизации теплоты ОГ до 540 (при $p_e = 0,1$ МПа), 555 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 570 (при $p_e = 0,7$ МПа) кг/ч или на 16; 13 и 10,9 %, поскольку интенсивность уменьшения расхода воздуха УДИТ по сравнению с дизелем КамАЗ-740 совпадает с таковой в отношении топлива, объяснение чего вполне понятно из методики определения обсуждаемых величин.

Как видно из рис. 2.15, тепловое «загрязнение» окружающей среды с ростом нагрузки непрерывно увеличивается независимо от того, используется УД в системе выпуска дизеля или нет.

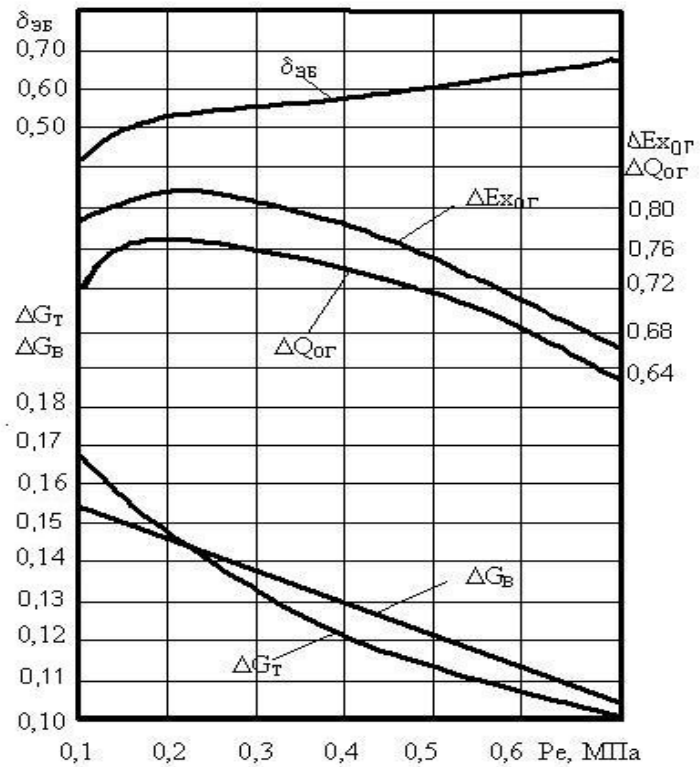


Рис. 2.15. Изменение степеней снижения расходов топлива и воздуха, теплового «загрязнения» окружающей среды, диссипации эксергии, коэффициента экологической безопасности (КЭБ) при выбросе отработавших газов дизеля КамАЗ-740 при его работе по нагрузочной характеристике

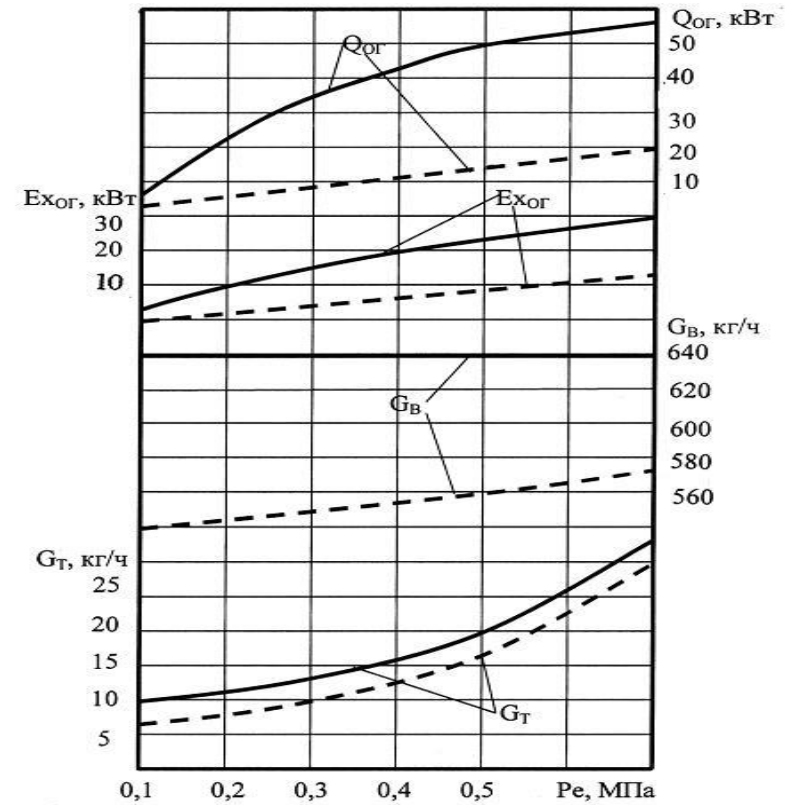


Рис. 2.16. Изменение показателей экологической безопасности дизеля КамАЗ-740 при работе по нагрузочной характеристике:
 ----- — без утилизации теплоты отработавших газов;
 - - - - - — при утилизации теплоты отработавших газов

Однако, если бы ОГ из дизеля выходили непосредственно в атмосферу, то тепловое «загрязнение» оказалось бы существенно выше. Так, если с ОГ дизеля до ДВПТВП выбрасывалось бы 6,3 (при $p_e = 0,1$ МПа), 41,5 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 58,1 (при $p_e = 0,7$ МПа) кВт, то после утилизатора эти цифры уменьшились до 1,7; 10,4 и 20,6 кВт соответственно или на 72,6; 75,0 и 64,5 %.

Степень снижения теплового «загрязнения» окружающей среды несколько увеличивается при росте среднего эффективного давления от 0,1 до 0,3 МПа, а затем монотонно снижается (рис. 2.15). Причина относительно меньшей величины рассматриваемого показателя при $p_e = 0,1$ МПа может заключаться в том, что при малой нагрузке и, соответственно, низкой температуре в цилиндре, относительно мало энергии рабочего тела идет на парообразование и перегрев сухого пара в результате чего температура заряда снижается незначительно.

Диссипация эксергии, выбрасываемой вместе с ОГ дизеля (до ДВПТВП), составляет 2,8 (при $p_e = 0,1$ МПа),..., 20,0 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 31,1 (при $p_e = 0,7$ МПа) кВт. После утилизатора эти цифры снизились до 0,6; 4,4 и 10,6 кВт соответственно или на 79,6; 78,0 и 64,7 %. Характер изменения степени снижения диссипации эксергии при выбросе ОГ практически совпадает с таковым для теплового «загрязнения» атмосферы. Коэффициент экологической безопасности равен 0,4 (при $p_e = 0,1$ МПа), 0,58 (при $p_e = 0,4$ МПа) и 0,68 (при $p_e = 0,7$ МПа). Таким образом, с ростом нагрузки наблюдается рост экологической безопасности двигателя.

Значительный практический интерес представляют результаты расчетной оценки изменения экологической безопасности дизеля КамАЗ-740 в условиях городской эксплуатации при утилизации теплоты его ОГ (расчеты, как и ранее, проводились с учетом использования 50 % общего количества отработавших газов). Как видно из материалов, приведенных на рис. 2.17, наибольший эффект в обсуждаемом плане достигается в отношении теплового «загрязнения» окружающей среды – степень снижения этого показателя составляет почти 80 %. Всего на 3 % меньше степень снижения диссипации эксергии при выбросе отработавших газов.

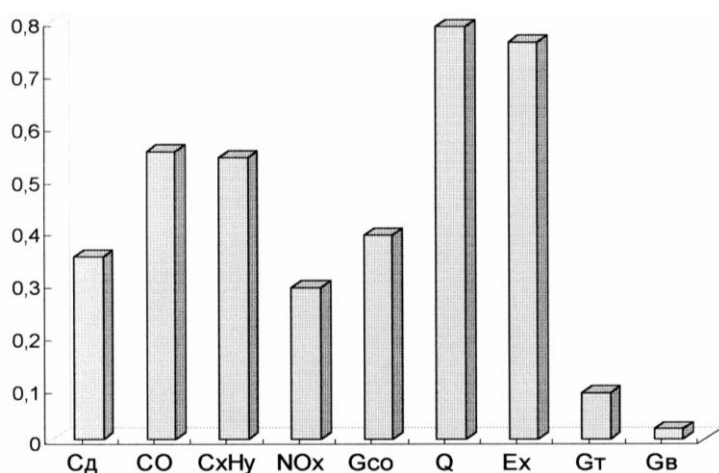


Рис. 2.17. Значения степеней снижения показателей, характеризующие экологическую безопасность дизеля КамАЗ-740 при его эксплуатации в городских условиях

Среди токсичных компонентов ОГ самые существенные изменения претерпевают концентрации окиси углерода и углеводородов – степени их снижения составляют соответственно 0,55 и 0,54. Заметно (на 35 %) уменьшается дымность ОГ и концентрация оксидов азота (на 29 %).

Степень снижения комплексного показателя вредности выбросов УДИТ, приведенных к CO, составила 0,39.

Незначительными оказались изменения степеней расхода топлива и воздуха – всего 0,09 и 0,02 соответственно (отличие показателей объясняется разными величинами коэффициентов расхода воздуха при работе на различных режимах).

Степень повышения экологической безопасности при эксплуатации дизеля КамАЗ-740 в городских условиях составила 0,436. Абсолютные величины показателей экологической безопасности без применения утилизации теплоты ОГ и в случае использования УД показаны на рис. 2.18 и в специальных комментариях не нуждаются.

Подводя итог рассмотрению представленных материалов, можно констатировать целесообразность оборудования выпускной системы дизеля утилизатором-двигателем с внешним подводом теплоты и внутренним парообразованием.

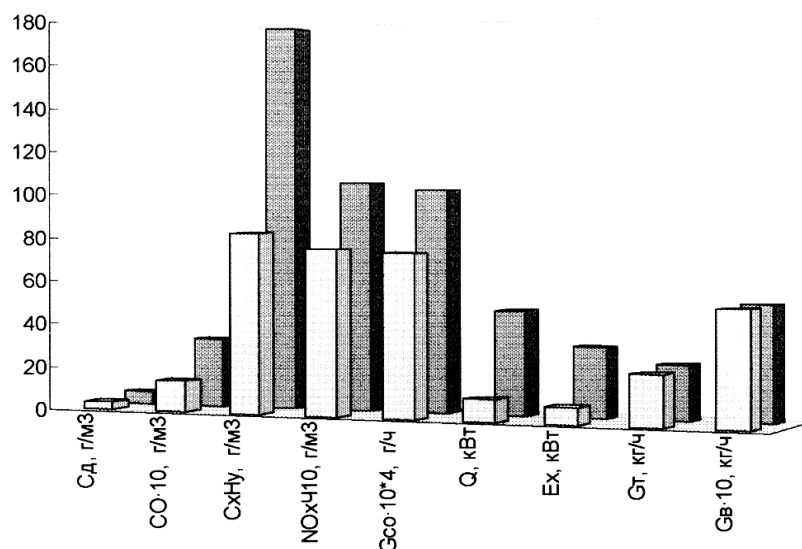


Рис. 2.18. Показатели экологической безопасности дизеля КамАЗ-740 при его эксплуатации в городских условиях без утилизации теплоты отработавших газов и с ее утилизацией

Наряду с вышеприведенным принципом снижения вредного воздействия ОГ поршневых ДВС важное значение имеет также повышение каталитической их нейтрализации. В процессе выполнения НИР выполнен анализ структуры энергии потока отработавших газов поршневого ДВС с каталитическим нейтрализатором и механизм её передачи к рабочему телу ранее рассмотренной и исследованной утилизационной установки, а также система показателей для оценки энергии потока отработавших газов дизеля и процесса ее передачи к рабочему телу утилизационной установки с учетом затрат энергии для обеспечения подачи атмосферного воздуха в каталитический нейтрализатор. Физическое и математическое моделирование процесса стабилизации температуры ОГ в процессе расчетно-аналитического исследования позволило определить температурный диапазон, позволяющий наиболее полно реализовать потенциал очистки ОГ от вредных веществ в КН с платиновым покрытием блочного типа, лежащий в пределах от 573 до 723 К. Теоретическое исследование выявило целесообразность использования тепловой энергии ОГ посредством теплового аккумулятора (ТА) для повышения эффективности работы КН. Приближенное аналитическое решение задач теплового баланса при заряде и разряде ТА с фазовым переходом позволяет выполнить моделирование процесса стабилизации температуры потока отработавших газов на входе в каталитический нейтрализатор ПДВС. Модель содержит лишь конструктивные и режимные параметры, позволяющие определять временной ход режимных параметров процесса в различных условиях эксплуатации ТА. Разработанный алгоритм и программное обеспечение упрощают расчет процесса стабилизации температуры потока ОГ в тепловом аккумуляторе системы выпуска ПДВС.

На основании вышеизложенного определены направления дальнейших экспериментальных исследований: а) исследование процесса теплопередачи в ТА на режимах заряда и разряда для проверки адекватности математической модели процесса стабилизации температурного режима работы каталитического нейтрализатора (КН) и б) исследование влияния процесса стабилизации температуры потока ОГ на эффективность работы КН при ездовых испытаниях.

Глава 3. СНИЖЕНИЕ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВС НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

3.1. Структура энергии потока отработавших газов поршневого ДВС с каталитическим нейтрализатором и механизм её передачи к рабочему телу утилизационной установки

При рассмотрении ОГ поршневых ДВС приходится иметь дело с потоком вещества, т.е. с открытой термодинамической системой. Поскольку движение потока газов по элементам системы выпуска сопровождается передачей теплоты от ОГ в окружающую среду, а процесс их выброса нельзя считать протекающим достаточно медленно, то, строго говоря, этот процесс является неравновесным. Однако, сделав предположение о квазиравновесности (это предположение в отношении процессов выпуска относится ко второму порядку приближения [18]), можно воспользоваться уравнениями термодинамики для равновесных состояний и получить основные характеристики процессов, не отягчённых неравновесностью.

Рассмотрим установившийся поток ОГ с термическими параметрами $p_{ог}$ и $T_{ог}$. Параметры окружающей среды обозначим соответственно p_{oc} и T_{oc} . Очевидно, что для ОГ поршневых ДВС $p_{ог} > p_{oc}$ и $T_{ог} > T_{oc}$. Наличие градиента потенциалов обуславливает возможность механического (деформационного) и термического взаимодействия ОГ с окружающей средой, т.е. принципиальную возможность производства работы. На рис. 3.1 показана обобщенная схема устройства, которая дает эту возможность реализовать [10]. Она состоит из системы 1, использующей термический потенциал, обусловленный температурным градиентом $\Delta T = T_{ог} - kT_{oc}$ при $p_{ог} = idem$ для реализации прямого цикла, преобразующего энергию теплового потока в работу; изотермической расширительной машины 2, функционирующей при $T_{oc} = idem$ за счет перепада давлений $\Delta p = p_{ог} - p_{oc}$, и тела 3, которому передаётся работа (это тело входит в рассматриваемую систему и не является окружающей средой).

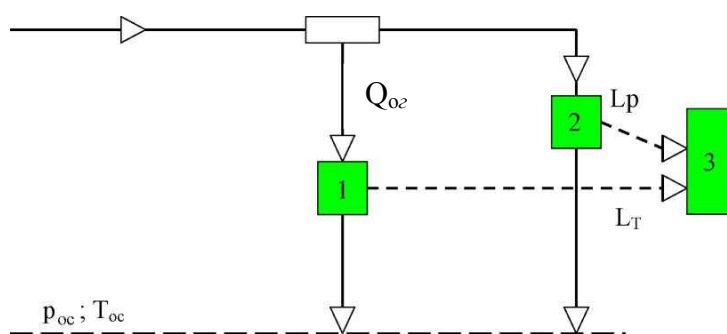


Рис. 3.1. Принципиальная схема устройства для получения работы из энергии потока отработавших газов

В принципе возможна и обратная последовательность преобразования имеющихся потенциалов в работу, т.е. вначале Δp можно трансформировать в работу при $T_{ог} = idem$, а затем с помощью системы, реализующей прямой цикл, в работу превращать термический потенциал. Пусть при реализации прямого обратимого цикла в устройстве 1 к его рабочему телу от ОГ отводится некоторое количество энергии. В рассматриваемом случае это неиспользованная в цилиндре двигателя часть теплоты, выделившаяся при сжигании там топлива. Назовём её теплотой выбрасываемых из цилиндра отработавших газов ($Q_{ог}$). Очевидно, что:

$$Q_{ог} = m_{ог} \cdot c_{p_{ог}} \cdot (T_{ог} - T_{oc}) = H_{ог} - H_{oc}, \quad (3.1)$$

где m_{O_2} – масса ОГ, Cp_{O_2} – изобарная средняя удельная теплоёмкость ОГ;

$H_{O_2} - H_{oc}$ – соответственно энтальпии ОГ и окружающей среды.

Максимальное количество работы, которая может быть получена из этой теплоты, определяется её термической эксергией Ex_T :

$$Ex_T = m_{O_2} \cdot Cp_{O_2} \cdot (T_{O_2} - T_{oc}) - T_{oc} \cdot \Delta S = \Delta H - T_{oc} \cdot \Delta S = \Delta H \frac{\bar{T}^* - T_{oc}}{\bar{T}^*} = \Delta H \cdot \tau_e, \quad (3.2)$$

где \bar{T}^* – среднетермодинамическая температура процесса передачи теплоты от ОГ к рабочему телу устройства, реализующего прямой обратимый цикл;

ΔS – изменение энтропии ОГ в процессе передачи теплоты;

$\tau_e = \frac{\bar{T}^* - T_{oc}}{\bar{T}^*}$ – коэффициент коэффициент Карно [9].

Использование разницы давлений p_{O_2} и p_{oc} в машине 2 (см. рис. 3.1) позволяет получить ещё некоторое количество работы (L_P), которая представляет собой механическую составляющую эксергии ОГ (Ex_P). Поскольку эта работа получается при изотермическом расширении, то:

$$L_P = Ex_P = m_{O_2} \cdot R_{O_2} \cdot T_{oc} \cdot \ln(p_{O_2}/p_{oc}), \quad (3.3)$$

где R_{O_2} – индивидуальная газовая постоянная ОГ.

Кроме термической и механической, эксергия ОГ содержит ещё и химическую составляющую (Ex_x), представляющей собой сумму концентрационной Ex_{xk} и реакционной эксергии Ex_{xp} [97]. Концентрационная эксергия определяется как максимальная работа, которая может быть получена в процессе выравнивания концентрации компонентов, составляющих ОГ при полном сгорании топлива в цилиндре дизеля, с их концентрацией в окружающей среде. Если допустить, что ОГ представляет собой смесь идеальных газов, состоящую из продуктов полного сгорания, то [10]:

$$Ex_{xk} = m_{O_2} R_{O_2} T_{oc} \left[r_{N_2} \ln \frac{r_{N_2}}{r_{ocN_2}} + r_{O_2} \ln \frac{r_{O_2}}{r_{ocO_2}} + r_{CO_2} \ln \frac{r_{CO_2}}{r_{ocCO_2}} + r_{H_2O} \ln \frac{r_{H_2O}}{r_{ocH_2O}} + \ln(1 + r_{H_2O}) \right]. \quad (3.4)$$

Здесь r_i и r_{oci} – молярные доли i -го компонента в ОГ и в окружающей среде (для атмосферного воздуха данные по r_{oci} приведены в работе [97]).

Для быстрой оценки величины Ex_{xk} можно использовать графическое решение, предложенное З. Рантом [10], или составленной В.С. Кукисом номограммой [62] в соответствии с формулой (3.4) для дизельного топлива с элементарным составом: C = 0,87; H = 0,125; O = 0,005.

Реакционная эксергия Ex_{xp} связана с возможностью протекания в термодинамической системе химических реакций. Отработавшие газы, выходящие из цилиндра двигателя, содержат компоненты, представляющие такую возможность. Основными из них являются: оксид углерода, углеводороды, оксиды азота, сернистый ангидрит, бенз(а)пирен, углеводород и др.

Расчёт реакционной эксергии Ex_{xp} ведётся по уравнению [10]:

$$Ex_{xp} = \sum_{j=1}^{j=n} [m_j (\Delta G_j + r_j ex_j)], \quad (3.5)$$

где n – количество компонентов ОГ, способных участвовать в химреакциях; m_j – масса j -го компонента ОГ, способного участвовать в химической реакции; ΔG_j – изменение функции Гиббса в реакции j -го компонента при p_{oc} и T_{oc} ; r_j – объёмная доля j -го компонента в ОГ; ex_j – эксергия j -го компонента.

Значения ΔG_j и ex_j приведены в научной и справочной литературе [9–10; 47; 97; 107 и др.]. Для определения Ex_{xp} могут быть использованы и номограммы [115].

Учитывая все рассмотренные составляющие, энергию ОГ, выходящих из цилиндра двигателя, можно представить в виде суммы:

$$E_{o_2} = Q_{o_2} + Ex_{p_{o_2}} + Ex_{x_{o_2}} = A_{o_2} + Ex_{m_{o_2}} + Ex_{p_{o_2}} + Ex_{x_{k_{o_2}}} + Ex_{x_{p_{o_2}}}, \quad (3.6)$$

где A_{o_2} – анергия потока теплоты.

Если выпускная система поршневого ДВС оборудована термическим или каталитическим нейтрализатором, то при прохождении через него ОГ, некоторые их компоненты участвуют в химических реакциях с выделением теплоты. В результате реакционная эксергия Ex_{xp} этих компонентов трансформируется в термическую эксергию Ex_t и уходящие из нейтрализатора газы (УГ) содержат меньшее количество химической реакционной эксергии Ex_x , чем ОГ, вышедшие из цилиндра двигателя, но большее количество Ex_t и анергии A_{o_2} .

В результате, при неизменном запасе энергии рассматриваемого потока продуктов сгорания его структура несколько изменится:

$$E_{y_2} = E_{o_2} = Q_{y_2} + Ex_{p_{o_2}} + Ex_{x_{y_2}} = A_{y_2} + Ex_{m_{y_2}} + Ex_{p_{y_2}} + Ex_{x_{k_{y_2}}} + Ex_{x_{p_{y_2}}}. \quad (3.7)$$

Описанная энергетическая ситуация показана графически на рис. 3.2 соответствующей суммой полос. Рисунок 3.2 соответствует реальной ситуации, когда химические реакции с участием компонентов ОГ прошли не на всю глубину, т.е. уходящие из нейтрализатора газы обладают ещё некоторым запасом химической реакционной эксергии Ex_x . В идеальном случае реакции пройдут на всю глубину и УГ будут обладать механическим, термическим потенциалом и химической концентрационной эксергией.

Очевидно, что из перечисленных составляющих энергии УГ использовать (утилизировать) можно лишь механическую составляющую $Ex_{p_{o_2}}$ и энергию теплового потока Q_{y_2} .

Известны два способа использования у ОГ поршневых ДВС первой из упомянутых составляющей энергии УГ [22].

В одном случае эту часть энергии ОГ используют для улучшения показателей газообмена в цилиндре двигателя. Сконструировав соответствующим образом впускной трубопровод и выбрав оптимальные фазы газораспределения, можно за счёт газодинамических явлений получить такое изменение давления на выпуске, при котором существенно возрастает масса свежего заряда, уменьшается отрицательная работа процесса выпуска, а, следовательно, улучшаются эффективные показатели двигателя.

Во втором случае применяются дополнительные устройства: волновые обменники давления и газовые турбины. В волновом обменнике давления происходит предварительное сжатие воздуха (или смеси – в карбюраторных двигателях) перед его поступлением в цилиндр. Широкое распространение получили комбинированные двигатели, в которых рассматриваемая составляющая энергии ОГ ДВС превращается в работу в турбине.

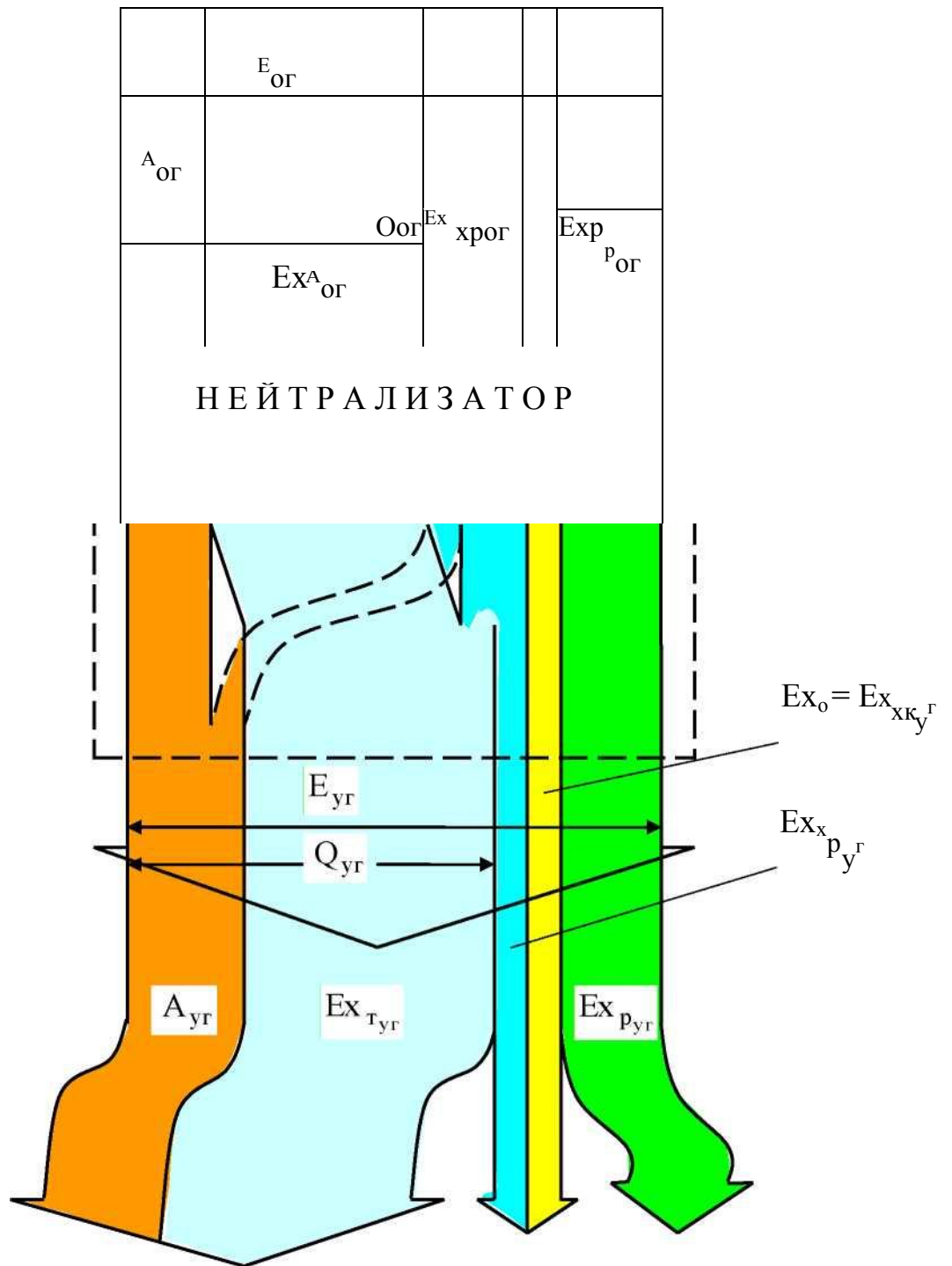
В обоих отмеченных случаях утилизации механической эксергии Ex_p ОГ её отбор производят до нейтрализатора. Вопросы утилизации рассматриваемой составляющей достаточно эффективно решены в практике двигателестроения и в данной работе не рассматриваются.

Проанализируем имеющиеся возможности использования энергии потока теплоты Q_{y_2} .

Очевидно, что всю теплоту Q_{y_2} (и соответственно её эксергию) нельзя полностью использовать для обеспечения работы утилизационной установки, реализующей прямой термодинамический цикл, т.к. максимальная температура рабочего тела всегда должна быть выше температуры окружающей среды.

Рассмотрим возможности использования энергии Q_{y_2} для случая, когда утилизационной установкой является двигатель Стирлинга (ДС). Допустим, что наименьшая максимальная температура рабочего тела, при которой может функционировать утилизационный Стирлинг, составляет T^* . Тогда цикл Стирлинга, реализуемый в установке, на рис. 3.3 изобразится совокупностью процессов a-b, b-c, c-d, d-a.

ДИЗЕЛЬ



В устройство, реализующее УГ в атмосферу

Рис. 3.2. Энергетический баланс работы дизеля с нейтрализатором

Удельное количество теплоты, которое будет отведено от УГ для последующей утилизации, определится по формуле:

$$q_{yg}^{ym} = q_{yg} \cdot \xi_Q, \quad (3.8)$$

где ξ_Q – доля теплоты, отводимой от УГ для последующей утилизации, в теряемой с УГ теплоте.

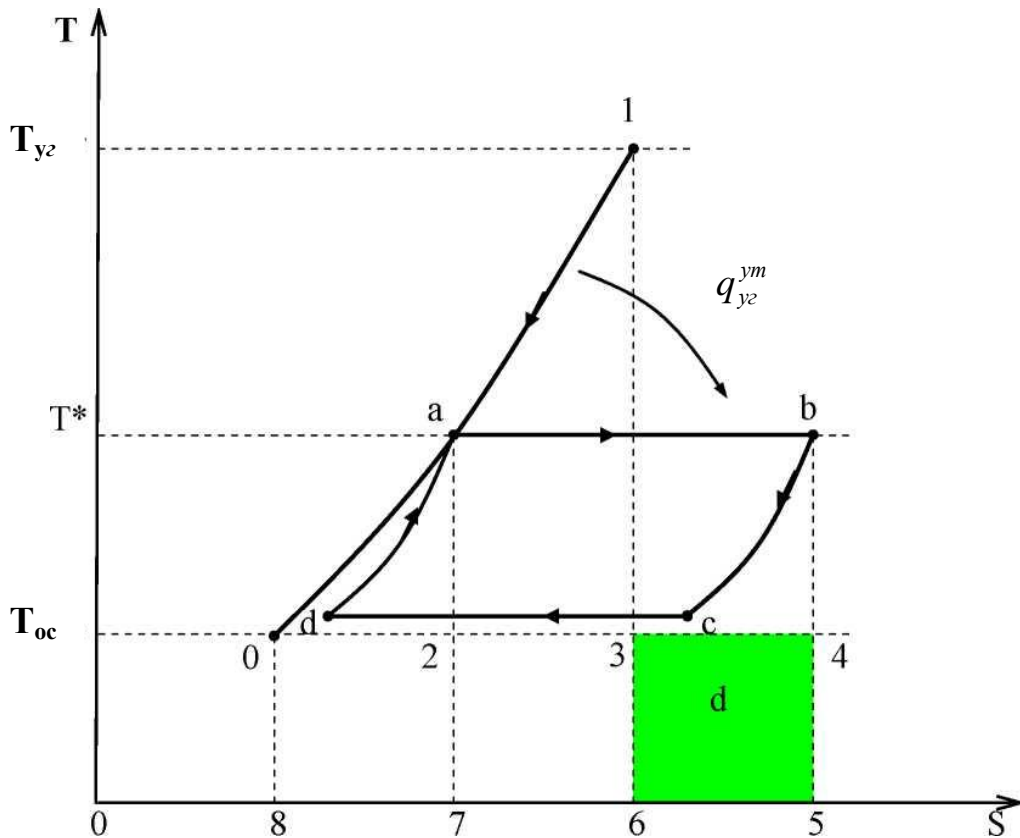


Рис. 3.3. Процесс охлаждения уходящих газов и передачи теплоты в утилизирующее устройство, реализующее прямой цикл Стирлинга

На рис. 3.3 эта теплота эквивалентна площади 1-а-7-6. Удельная термическая эксергия q_{yc} , которая может быть использована в процессе утилизации, эквивалентна площади 1-а-2-3. Площадь 3-2-7-6 пропорциональна энергии теплоты q_{yc}^{ym} .

Допустим, что в идеальном случае вся теплота, отведённая от УГ в процессе 1-а, подводится к рабочему телу утилизационной установки. Сказанное, однако, не может относиться к эксергии. Связано это с тем, что переход теплоты от УГ к рабочему телу Стирлинга происходит в условиях существования конечной разницы температур тел, обменивающихся теплотой. Это вызывает потерю (диссипацию) эксергии (d), которая на рис. 3.3 эквивалентна площади 4-3-6-5. В результате рабочее тело утилизационной установки может получить

$$ex_{pm}^{ym} = |ex_{yc}^{ym}| - d. \quad (3.9)$$

На рис. 3.3 эта теплота эквивалентна площади 1-а-7-6. Удельная термическая эксергия q_{yc} , которая может быть использована в процессе утилизации, эквивалентна площади 1-а-2-3. Площадь 3-2-7-6 пропорциональна энергии теплоты q^1 .

На рис. 3.4 показана зависимость рассмотренных составляющих энергии потока теплоты q_{yc}^{ym} в функции ξ_Q для продуктов сгорания дизельного топлива в безразмерной форме для условий $T_{yc} = 1000$ К; $T_{oc} = 293$ К (масштабом отнесения служило произведение индивидуальной газовой постоянной УГ на температуру окружающей среды).

Как видно, количество теплоты, отводимое от УГ к рабочему телу Стирлинга, с ростом ξ_Q линейно увеличивается и ex_{yc}^{ym} , а снижение среднетермодинамической температуры процесса теплоотвода обуславливает постепенное уменьшение величины $d(ex_{yc}^{ym})/d\xi_Q$.

Кривая $\overline{ex}_{pm}^{ym} = f(\xi_Q)$ имеет экстремум, и после достижения максимума (при $\xi_Q \approx 0,6$) количест-

во эксергии, которое можно утилизировать, заметно убывает. Соответственно увеличивается диссипация эксергии теплоты, которая передаётся рабочему телу утилизационной установки. Это указывает на то, что использование теплоты УГ при высоких значениях ξ_Q целесообразно лишь для нужд отопления, так как она становится всё менее пригодной для превращения в работу и при $\xi_Q = 1$ совершенно теряет способность трансформироваться в неё.

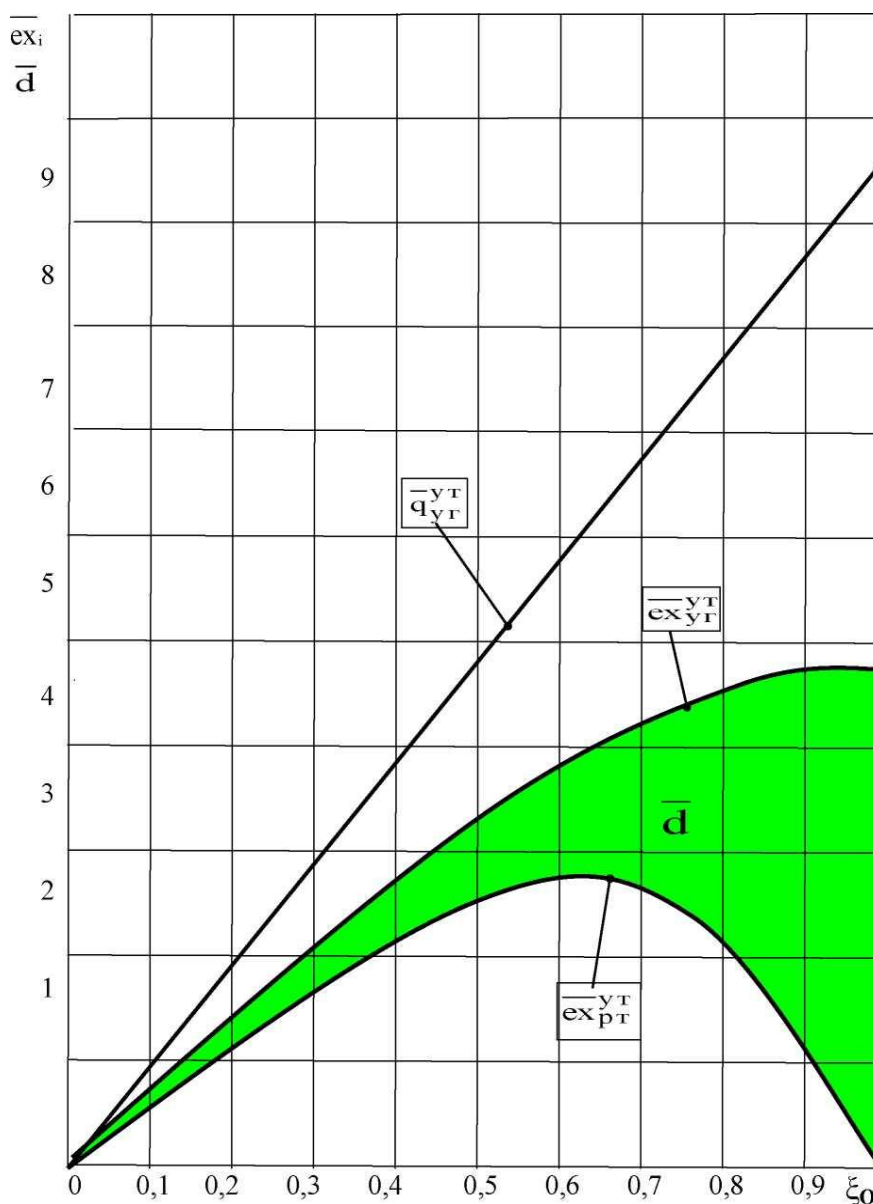


Рис. 3.4. Зависимость энергетических характеристик уходящих из нейтрализатора газов от доли теплоты, отводимой от них для последующей утилизации

Следует отметить, что с увеличением $\dot{T} = T_{y2}/T_{oc}$ максимум кривой смещается в сторону больших значений ξ_Q (рис. 3.5).

Установленный факт свидетельствует о том, что отбор теплоты для привода утилизационного ДС от газов, уходящих из каталитического нейтрализатора (КН) (т.е. с более высокой температурой, чем на выходе из цилиндров дизеля), обеспечивает не только возможность получения утилизатором большего количества теплоты, но и повышение работоспособности последней. Это чрезвычайно важно для систем, назначением которых является трансформация теплоты в работу.

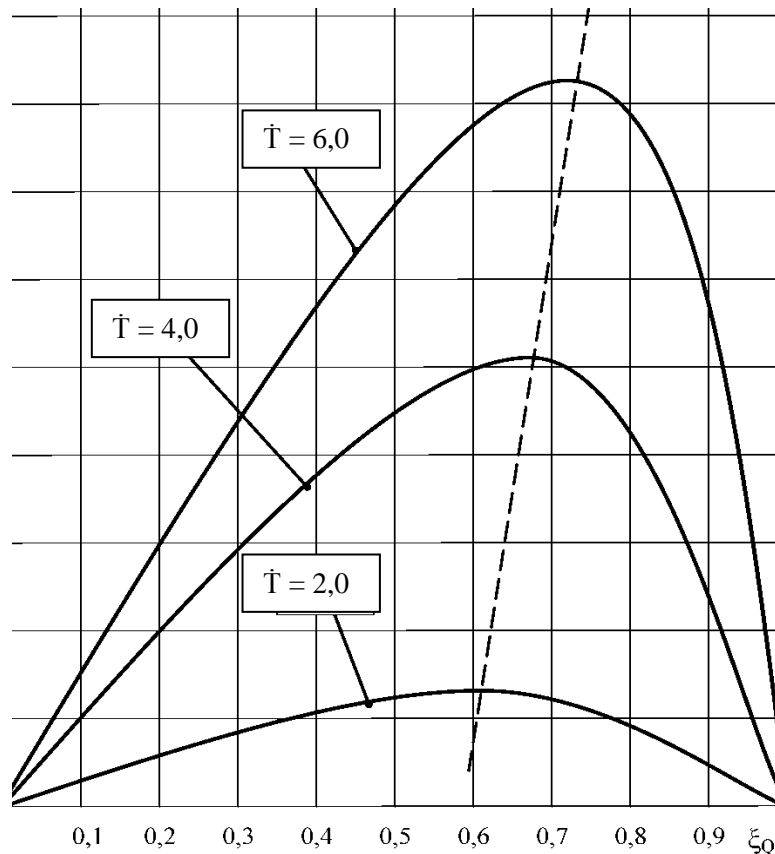


Рис. 3.5. Зависимость термической эксергии, поступающей к рабочему телу утилизационной установки, от относительной температуры уходящих газов

Подводя итог всему сказанному, следует подчеркнуть, что изложенные выше соображения должны учитываться как при выборе места установки утилизационного ДС (с целью обеспечения максимально возможного значения \dot{T}), так и при выборе температуры процесса передачи теплоты от УГ к рабочему телу утилизационной установки.

Энергия, эквивалентная площади а-0-8-7 на рис. 3.3, представляет собой удельную теплоту, отводящуюся от УГ в окружающую среду (q_{y2}^{oc}), которая включает в себя термическую эксергию этой теплоты ex_{y2}^{oc} (площадь а-0-2) и анергию a_{y2}^{oc} (площадь 2-0-8-7).

Такова структура энергии теплового потока уходящих из нейтрализатора газов в случае ее утилизации с помощью двигателя Стирлинга.

3.2. Система показателей для оценки энергии потока отработавших газов дизеля и процесса ее передачи к рабочему телу утилизационной установки

Рассмотренная в предыдущем разделе энергетическая картина потока ОГ дизеля с учетом их прохождения через нейтрализатор и использования термического потенциала УГ для реализации прямого термодинамического цикла утилизационной установки позволяет составить систему балансовых уравнений:

$$Ex_{pm}^{ym} = E_{y2} - Ex_{p_{o2}} - Ex_{xk} - D - A_{y2}; \quad (3.10)$$

$$Ex_{pm}^{ym} = Q_{y2} - D - A_{y2}; \quad (3.11)$$

$$Ex_{pm}^{ym} = Ex_{m_{y2}} - Ex_{p_{o2}} - Ex_{xk} - D. \quad (3.12)$$

Очевидно, что первое из них описывает энергетическую картину рассматриваемого процесса во всей полноте, второе является эксерго-анергетическим балансом теплового потока, а третье – эксергетическим балансом потока УГ.

После деления уравнения (3.10) на E_{y_2} , формулы (3.11) – на Q_{y_2} , а выражения (3.12) – на $E_{x_{y_2}}$ перечисленные зависимости примут вид:

$$f_e = 1 - \delta_e^p - \delta_e^x - \delta_e^d - \delta_e^a; \quad f_q = 1 - \delta_q^d - \delta_q^a; \quad f_{ex} = 1 - \delta_{ex}^p - \delta_{ex}^x - \delta_{ex}^d.$$

Полученные безразмерные величины имеют вполне определенный физический смысл: f_e – это доля энергии потока УГ, которая может быть передана в утилизационную установку, реализующую прямой термодинамический цикл и теоретически полностью трансформирована там в работу. Назовем f_e потенциальной степенью использования энергии потока УГ. По аналогии f_q может быть названа потенциальной степенью использования термического потенциала УГ, а параметр f_{ex} – потенциальной степенью использования эксергии потока УГ в рассматриваемой утилизационной установке.

Параметры $\delta_i^p, \delta_i^x, \delta_i^d, \delta_i^a$ являются относительными величинами потерь работоспособности УГ, связанных с неиспользованием соответственно механической, химической, составляющих эксергии, ее диссипации, а также наличием в энергии потока УГ определенного количества анергии.

К рассмотренным величинам целесообразно добавить эксергетические характеристики (характеристики работоспособности) потока теплоты УГ (Q_{y_2}) и теплоты, передаваемой в утилизационный агрегат ($Q_{y_2}^{ym}$). Эти характеристики представляют собой соответствующие коэффициенты Карно. С помощью приведенных в таблице 3.1 характеристик можно проводить детальный анализ структуры энергии потока продуктов сгорания в системе выпуска ОГ дизеля с нейтрализатором, фиксируя потери работоспособности, обусловленные теми или иными конкретными причинами.

3.3. Затраты энергии для обеспечения подачи атмосферного воздуха в каталитический нейтрализатор

Как отмечалось ранее, для повышения эффективности снижения содержания СО, $C_x H_y$ и сажи в каталитическом нейтрализаторе (КН) целесообразно увеличивать количество кислорода, участвующего в реакциях окисления, так как в ОГ дизелей его содержание незначительно (2–18 % по объему) [27]. Ввод в КН дополнительного кислорода может быть осуществлен в результате эжекции атмосферного воздуха за счет энергии ОГ или подачи в него воздуха с помощью вентилятора. Реализация эжекции атмосферного воздуха связана с некоторым увеличением гидравлического сопротивления выпускного тракта и, следовательно, определенным повышением содержания в отработавших газах СО и сажи [38; 75]. Второй путь требует затрат энергии на привод вентилятора. Как отмечалось выше, эта энергия может быть получена за счет утилизации теплоты уходящих из КН газов, например с помощью ДС.

Оценим количество и качество энергии, необходимой для обеспечения КН атмосферным воздухом в требуемом количестве.

Известно [7], что потребляемая вентилятором мощность может быть вычислена по формуле:

$$N_B = \frac{G_B \cdot \Delta p_{KH}}{3600 \cdot \eta_B}, \quad (3.13)$$

где G_B – объемный расход воздуха, подаваемого вентилятором в КН, $m^3/ч$; Δp_{KH} – противодействие, создаваемое на выпуске КН, кПа; η_B – коэффициент полезного действия вентилятора.

Возникающее в современных сложных многоступенчатых нейтрализаторах противодействие складывается из противодействий, создаваемых отдельными элементами: сетевым фильтром, окислительным и восстановительным блоками. Анализ специальной литературы [38, 71–76 и др.] показывает, что в существующих КН отечественного и зарубежного производства при изменении относительной массы катализатора (отношение массы катализатора к мощности дизеля) от 0,02 до 0,07 кг/кВт противодействие выпуску сохраняется в пределах 3,70–7,25 кПа.

Система показателей для оценки энергии потока продуктов сгорания в системе выпуска ОГ дизеля с нейтрализатором

Показатель	Обозначение	Формула для расчета
Потенциальная степень использования энергии потока УГ	f_e	$\frac{Ex_{pг}^{yг}}{E_{yг}} = \frac{ex_{pг}^{yг}}{e_{yг}}$
Потенциальная степень использования термического потенциала УГ	f_q	$\frac{Ex_{pг}^{yг}}{Q_{yг}} = \frac{ex_{pг}^{yг}}{q_{yг}}$
Потенциальная степень использования эксергии потока УГ	f_{ex}	$\frac{Ex_{pг}^{yг}}{Ex_{T_{yг}}} = \frac{ex_{pг}^{yг}}{ex_{T_{yг}}}$
Относительные потери работоспособности, вызванные: – неиспользованием механической эксергии потока УГ – неиспользованием химической эксергии потока УГ	δ_e^p	$\frac{Ex_{pог}}{Q_{yг}} = \frac{ex_{pог}}{q_{yг}}$
	δ_q^p	$\frac{Ex_{pог}}{Ex_{T_{yг}}} = \frac{ex_{pог}}{e_{T_{yг}}}$
	δ_{ex}^p	
	δ_e^x	$\frac{Ex_{xк}}{E_{yг}} = \frac{ex_{xк}}{e_{yг}}$
	δ_q^x	$\frac{Ex_{xк}}{Q_{yг}} = \frac{ex_{xк}}{q_{yг}}$
	δ_{ex}^x	$\frac{Ex_{xк}}{Ex_{T_{yг}}} = \frac{ex_{xк}}{e_{T_{yг}}}$
Относительные потери работоспособности, вызванные: – диссипацией эксергии – наличием анергии в энергии потока УГ	δ_e^d	$\frac{D}{E_{yг}} = \frac{d}{e_{yг}}$
	δ_q^d	$\frac{D}{Q_{yг}} = \frac{d}{q_{yг}}$
	δ_{ex}^d	$\frac{D}{Ex_{T_{yг}}} = \frac{d}{ex_{T_{yг}}}$
	δ_e^a	$\frac{A_{yг}}{E_{yг}} = \frac{a_{yг}}{e_{yг}}$
	δ_q^a	$\frac{A_{yг}}{Q_{yг}} = \frac{a_{yг}}{q_{yг}}$
	δ_{ex}^a	$\frac{A_{yг}}{Ex_{T_{yг}}} = \frac{a_{yг}}{ex_{T_{yг}}}$
Характеристика работоспособности (коэффициент Карно) потока теплоты УГ	$\tau_{e_{yг}}$	$\frac{Ex_{T_{yг}}}{Q_{yг}} = \frac{T_{yг} - T_{oc}}{T_{yг}}$
Характеристика работоспособности (коэфф-т Карно) утилизируемой теплоты	$\tau_{e_{yг}}^{yг}$	$\frac{Ex_{yг}^{yг}}{Q_{yг}^{yг}} = \frac{T^* - T_{oc}}{T^*}$

Влияние удельной массы катализатора на противодавление проявляется практически по линейному закону. При увеличении удельной массы с 0,02 до 0,8 кг/кВт оно растёт с 3,5–4,4 до 7,1–8,0 кПа. Зависимость противодавления выпуску, создаваемого КН, от удельного габаритного

объема ($\text{м}^3/\text{кВт}$) нелинейная. При изменении удельного габаритного объема с 0,20 до 0,32 $\text{м}^3/\text{кВт}$ противодействие находится в пределах 0,35–0,42 кПа. При дальнейшем увеличении удельного габаритного объема $\Delta p_{\text{кн}}$ повышается практически линейно до 7,2–7,5 кПа [74–75].

На рис. 3.6 а показаны фрагменты результатов испытаний оснащенного каталитического нейтрализатора с пористыми каталитическими элементами дизеля КамАЗ-740 (линия 1), с псевдо-сжиженным слоем окислительного катализатора и пористым восстановительным каталитическим патроном (линия 2) при работе по нагрузочной характеристике на максимальной частоте вращения коленчатого вала ($n = 2\ 600\ \text{мин}^{-1}$) [74–75].

На рис. 3.6 б и 3.6 в проиллюстрированы изменения величины противодействия, создаваемого КН, в зависимости от продолжительности эксплуатации нейтрализатора [74–75]. Как видно из приведенных материалов, установка в выпускную систему дизелей современных КН приводит к увеличению противодействия на выпуске ОГ до величин, не превышающих 0,8 кПа.

При известной требуемой для привода вентилятора мощности, найденной с помощью уравнения (3.16), легко определить потребность в эксергии утилизационной установки, предназначенной для выработки мощности N_B :

$$Ex_{pm}^{ym} = \frac{N_B}{\eta_{ex}^{yy}}, \text{ кВт}, \quad (3.17)$$

где η_{ex}^{yy} – эксергетический КПД утилизационной установки.

Знание величины Ex_{pm}^{ym} позволяет найти количество теплоты, которое должно быть передано рабочему телу утилизационной установки от УГ. Если в качестве последней используется ДС, то

$$Q_{yz}^{ym} = Ex_{pm}^{ym} \left(\frac{T^*}{T^* - T_{oc}} \right), \text{ кВт}, \quad (3.18)$$

где T^* – максимальная температура рабочего тела Стирлинга, К.

Отношение выражений (3.17) и (3.18) дает возможность оценить работоспособность утилизируемой теплоты, определяющее качество энергии, передаваемой тепловым потоком Q_{yz}^{ym} .

Формулы (3.17) и (3.18) позволяют выполнить все расчеты, необходимые для оценки количества и качества энергии, требуемой для обеспечения КН воздухом в количестве G_B ($\text{м}^3/\text{ч}$).

При заданной величине противодействия КН значения рассмотренных выше параметров могут быть получены с помощью достаточно легко составляемых номограмм. На рис. 3.7 представлена номограмма, соответствующая наибольшему противодействию, характерному для современных КН (0,8 кПа) [56, 57, 74–75].

Определение искомых величин по номограмме производится следующим образом. Из точки, соответствующей требуемому расходу воздуха (в примере величина $G_B = 52\ \text{м}^3/\text{ч}$), проводим горизонтальную линию до пересечения с линией, соответствующей величине КПД вентилятора (на номограмме у этих линий нанесены значения 0,2; 0,3; 0,8).

В примере принято $\eta_B = 0,3$. Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на нижнюю шкалу номограммы, по которой определяем N_B (в примере $N_B = 0,38\ \text{кВт}$).

Для определения Ex_{pm}^{ym} из точки пересечения указанного перпендикуляра с соответствующей линией эксергетического КПД утилизационного ДС (на номограмме у этих линий стоят цифры 6 %; 8 %; ... ; 20 %), проводим горизонталь вправо и по шкале Ex_{pm}^{ym} находим искомую величину.

В рассматриваемом примере $\eta_{ex}^{yy} = 10\ \%$, а $Ex_{pm}^{ym} = 3,75\ \text{кВт}$. Если из точки пересечения проведенной горизонтали с соответствующей линией максимальной температуры рабочего тела ДС (600, 800, 1 000 или 1 200 К) подняться вертикально вверх, то по верхней шкале можно определить количество теплоты, которое требуется получить от УГ для обеспечения вентилятором требуемого расхода воздуха. В примере принята $T^* = 800\ \text{К}$. В результате потребность утилизационного ДС в теплоте составила 6 кВт.

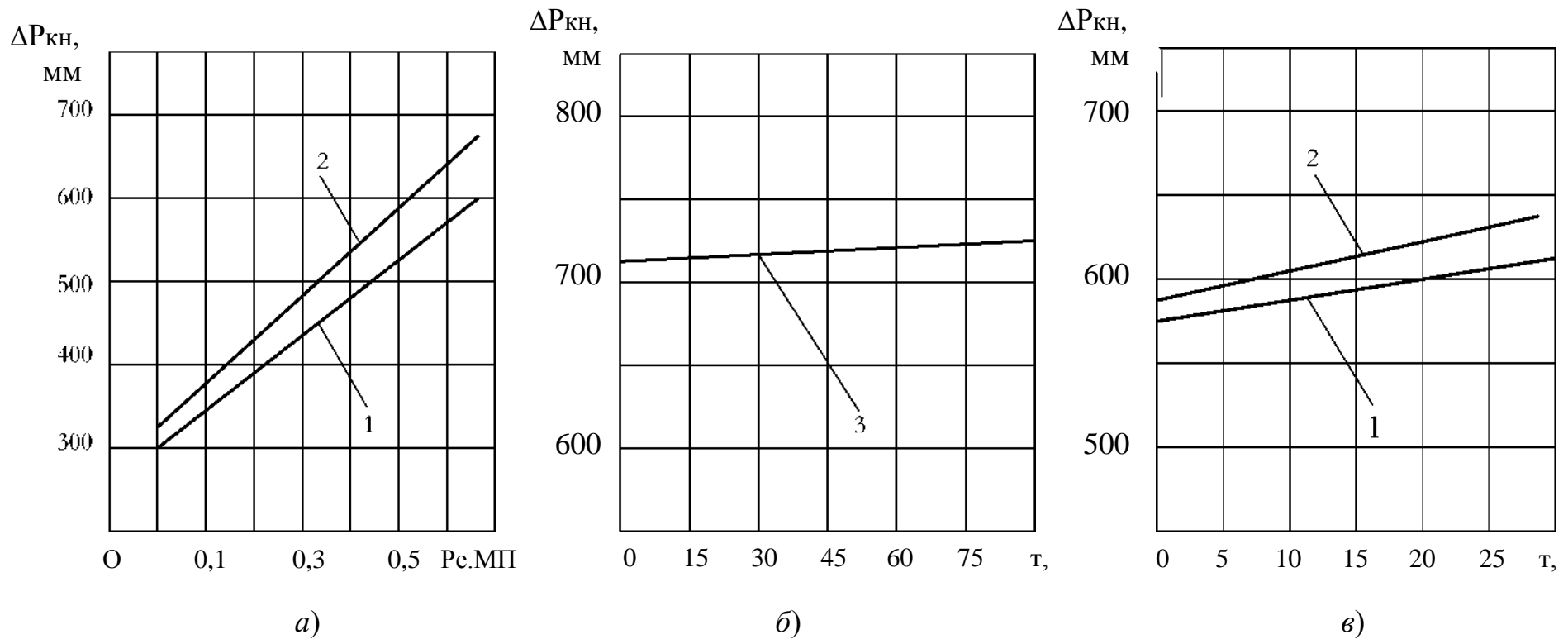


Рис. 3.6. Изменение противодействия, создаваемого каталитическим нейтрализатором в выпускной системе:

a – дизеля КамАЗ-740 при работе по нагрузочной характеристике ($n = 2\ 600\ \text{мин}^{-1}$); *б*, *в* – дизеля КамАЗ-740 и дизеля Д-440 соответственно в зависимости от продолжительности эксплуатации; 1 – с пористыми каталитическими элементами; 2 – с псевдожидким слоем окислительного катализатора и пористым восстановительным каталитическим патроном; 3 – с платиновым каталитическим элементом

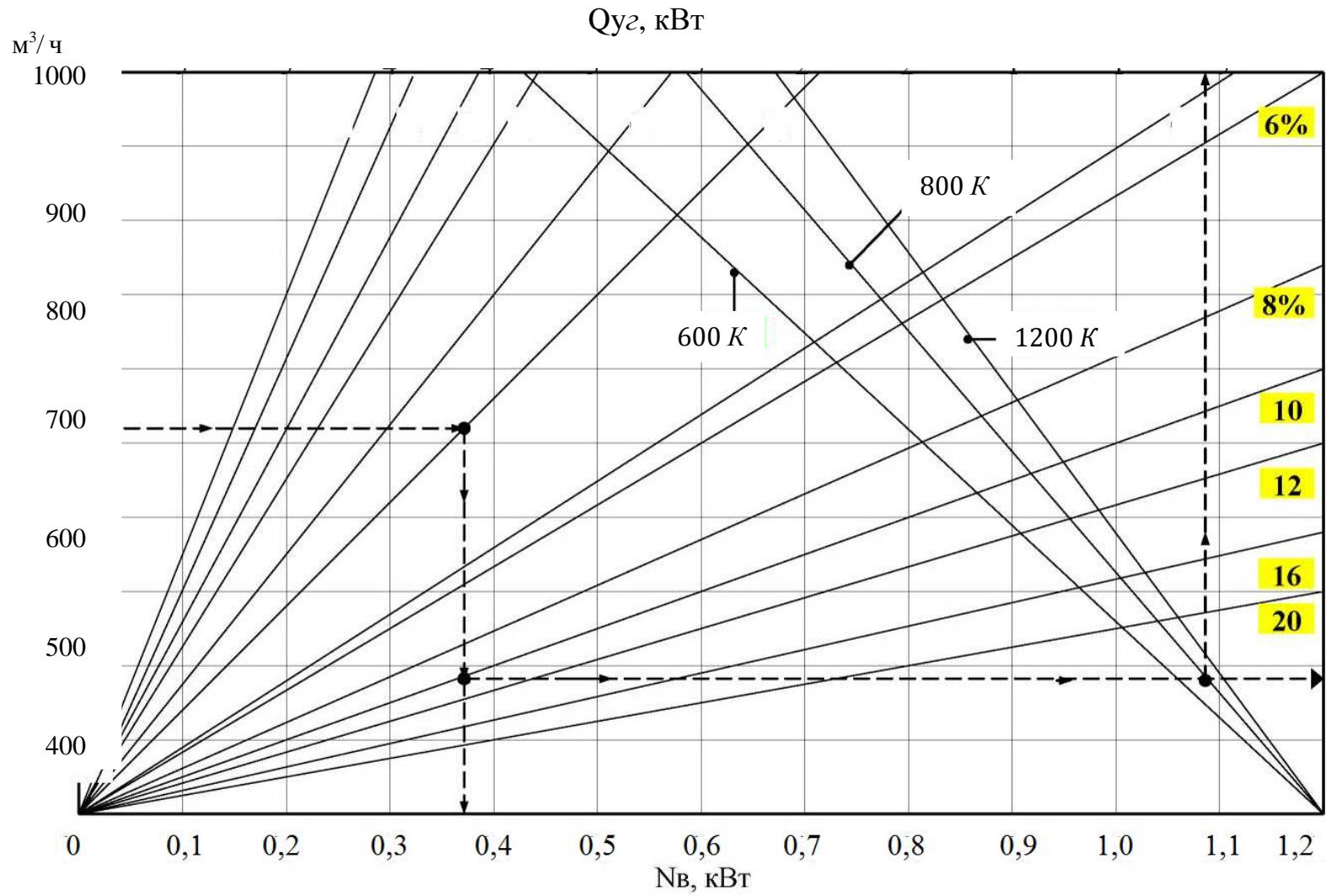


Рис. 3.7. Номограмма для определения затрат энергии на привод вентилятора

Глава 4. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВС ЗА СЧЕТ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА

4.1. Теоретическое обоснование целесообразности повышения эффективности очистки отработавших газов от вредных веществ в каталитическом нейтрализаторе

Наибольшее распространение для решения задачи снижения вредных выбросов с отработавшими газами ПДВС получили системы КН [73], имеющие достаточно высокую степень превращения вредных веществ. Однако в условиях реальной эксплуатации имеющийся потенциал КН по очистке ОГ полностью не реализуется. Рассмотрение причин этого явления целесообразно провести на основании действия законов химической кинетики.

Каталитический нейтрализатор представляет собой систему по воздействию на поток газа прежде всего на химическом уровне. Оценка совершенства процессов превращения в нем производится с учетом коэффициента η_f . Если мы имеем f токсичных веществ, то степень превращения каждого из них в ОГ определяется по формуле

$$\eta_f = (c_{f0} - c_{fi})/c_{f0}, \quad (4.1)$$

где c_{f0} и c_{fi} – концентрация f -го вещества в ОГ соответственно до и после нейтрализатора в г/м³.

Объемный расход отработавших газов V_{oz} четырехтактного ПДВС рассчитывается как:

$$V_{oz} = \alpha \cdot l_o \cdot G_m \cdot T_k \cdot R_g \cdot \mu / (P_k \cdot 10^6), \quad (4.2)$$

где α – коэффициент избытка воздуха; l_o – теоретически требуемое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, кг; G_m – часовой расход топлива, кг/ч; P_k – давление надвучного воздуха, (для двигателей без наддува $P_k = P_o = 0,1$ МПа); T_k – температура воздуха после компрессора, K (для двигателей без компрессора $T_k = T_o = 298$ K); R_g – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·K); μ – действительный коэффициент молекулярного изменения.

Любая химическая реакция имеет конечные скорости, поэтому необходима организация процесса нейтрализации вредных веществ до выхода ОГ из каталитического нейтрализатора. Тогда объем КН $V_{кат}$, м³ составляет [57]:

$$V_{кат} = V_{oz} / \omega_o, \quad (4.3)$$

где ω_o – объемная скорость ОГ ($\omega_o = 3600/\tau_n$), 1/с.

Исходя из этого, объемная скорость ОГ для большинства КН исчисляется в зависимости от времени пребывания реагирующих веществ в реакторе (не менее $t_n = 4,6 \cdot 10^{-2}$ с) [57]. За этот промежуток времени должна пройти полная реакция нейтрализации всех вредных составляющих ОГ.

Реальная эксплуатация вносит коррективы. В частности, из анализа [88] следует, что на режимах пуска холодного двигателя, холостого хода, нагрузочных режимах менее 20–35 % от полной нагрузки и некоторых переходных режимах нейтрализация ОГ протекает не в полном объеме и реакции превращения не заканчиваются на выходе из КН из-за несоответствия скорости течения реакции и времени пребывания ОГ в КН. Скорость реакции нейтрализации ОГ k , г/(с м³) в соответствии с законом Аррениуса можно выразить как

$$k = dc_{f0}/d\phi = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (4.4)$$

где A – постоянный множитель; E – энергия активации, Дж/(г моль); R – газовая постоянная, Дж/(г моль K); T – абсолютная температура, K.

Химическая реакция нейтрализации ОГ может быть осуществлена, если кинетическая энергия соударений превышает энергию активации, необходимую для ослабления или разрыва внутримолекулярных связей. Но не все молекулы обладают такой энергией. Лишь молекулы с избытком энергии, по сравнению с некоторой средней величиной энергии активации, могут вступать в реакцию. Для протекания реакции акт соударения является еще недостаточным, хотя и необходимым.

Энергия активации для реакций нейтрализации вредных веществ отработавших газов ПДВС постоянна и довольно хорошо исследована в ряде работ [57–58].

Значительно большее влияние на скорость протекания реакции, как показывают экспериментальные данные [61], оказывает рост температуры ОГ. Для определения температуры ОГ выразим связь между скоростью течения реакции и энергией активации реакции путем логарифмирования уравнения (4.4):

$$\ln k = -E \cdot (RT)^{-1} + \text{const.} \quad (4.5)$$

Определить температуру реакции нейтрализации можно легко, построив затем (для каждого конкретного случая) график в координатах $\ln k - E$. На основании расчетных данных и проведенных исследований [39] можно сделать вывод, что температурный диапазон, соответствующий эффективной работе КН с платиновым покрытием, лежит в пределах от 573 до 723 К. Именно в этом диапазоне температур обеспечивается полная реализация потенциала КН по очистке ОГ от вредных веществ (CO, NO, CH).

Рассмотрение теплового потенциала ОГ в условиях реальной эксплуатации свидетельствует о том, что температура ОГ на входе в КН меняется в более значительном диапазоне от 373 до 393 К при пуске холодного двигателя и от 773 до 923 К на режимах полной мощности. Как показывают испытания [88], при движения автомобиля в условиях города и бездорожья отклонения температуры от диапазона эффективной работы КН составляют от 30 до 42 %.

Из вышеизложенного следует, что для решения данной задачи целесообразно более детально рассмотреть структуру энергии потока ОГ поршневого двигателя, возможности перераспределения его теплового потенциала с целью стабилизации температурного режима работы КН посредством установки ТА в систему выпуска.

4.2. Структура энергии потока отработавших газов поршневого двигателя с тепловым аккумулятором и механизм ее передачи каталитическому нейтрализатору

Оценивая характер процессов в системе выпуска ОГ следует отметить, что приходится иметь дело с потоком вещества, т.е. открытой термодинамической системой с неравновесным процессом теплопередачи. Однако, сделав предположение о стационарности (это предположение относится ко второму порядку приближения [30]), можно воспользоваться уравнениями термодинамики для равновесных состояний и получить основные характеристики процессов.

Рассмотрим установившийся поток ОГ с термическими параметрами $p_{ог}$ и T^* . Параметры на входе в КН обозначим соответственно $p_{кн}$ и $T_{кн}$, а окружающей среды p_{oc} и T_{oc} . Очевидно, что для отработавших газов ПДВС $p_{ог} > p_{oc}$ и $T^* > T_{oc}$. Наличие градиентов потенциалов обуславливает возможность получения из потока ОГ работы или теплоты. Рассмотрение теплового потока ОГ, в соответствии с приведенными в подразделе 4.1 материалами, целесообразно с точки зрения обеспечения возможности стабилизации температуры $T_{кн}$. Схема устройства, с помощью которого эта возможность может быть реализована, состоит из системы, использующей термодинамический потенциал, обусловленный температурным градиентом T^* и $T_{кн}$ при $p_{ог} = idem$ для реализации стабилизации температуры (рис. 4.1).

В случае когда $T^* > T$ (где T – температура ТА), часть энергии теплового потока ОГ преобразуется во внутреннюю энергию $U_{пр}$ рабочего тела ТА. Рабочее тело, которому передается теплота, входит в рассматриваемую систему и не является окружающей средой. При $T^* < T$ процесс протекает в обратном направлении. Запасенная рабочим телом ТА энергия передается потоку ОГ, повышая его температуру. В рассматриваемом случае это неиспользованная в цилиндре двигателя часть теплоты, выделившейся при сжигании топлива. Назовём её теплотой $Q_{ог}$, Вт, выбрасываемых из цилиндра ОГ [10]:

$$Q_{ог} = G_{ог} \cdot c_{ог} (T^* - T_{oc}) = H_{ог} - H_{oc}, \quad (4.6)$$

где $G_{ог}$ – массовый расход ОГ, кг/с; $c_{ог}$ – удельная теплоёмкость ОГ, Дж/(кг К); $H_{ог}$, H_{oc} – соответственно энтальпии ОГ и окружающей среды, Дж.

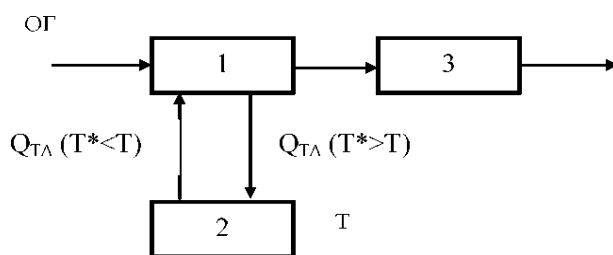


Рис. 4.1. Принципиальная схема устройства для стабилизации температуры потока отработавших газов:

1 – тепловой аккумулятор (ТА); 2 – рабочее тело ТА; 3 – каталитический нейтрализатор (КН)

Кроме тепловой, энергия ОГ содержит еще ряд составляющих: кинетическую энергию потока ($E_{кин}$) и химическую энергию ($E_{хим}$).

Кинетическую энергию потока $E_{кин}$, Дж, можно определить из выражения:

$$E_{кин} = m_{ог} \cdot \omega^2 / 2, \quad (4.7)$$

где ω – скорость потока ОГ, м/с.

Реализация этой составляющей ($E_{кин}$) принципиально возможна только для получения некоторого количества работы и здесь не рассматривается.

Энергия химических реакций $E_{хим}$ связана с возможностью их протекания в термодинамической системе. Отработавшие газы, выходящие из цилиндра двигателя, содержат компоненты, предоставляющие такую возможность. Основными из них являются: СО, СН, NO, сернистый ангидрид, бенз(а)пирен и др. Расчет химической энергии $E_{хим}$, Дж, ведется по уравнению [9]:

$$E_{хим} = \sum_{i=1}^{i=n} (m_j (\Delta H_j + r_j \cdot e_j)), \quad (4.8)$$

где n – количество компонентов ОГ, способных участвовать в химических реакциях;

m_j – масса j -го компонента ОГ, способного участвовать в химической реакции, кг;

ΔH_j – изменение энтальпии в реакции j -го компонента при p_{oc} и T_{oc} , Дж;

r_j – объёмная доля j -го компонента в ОГ, %; e_j – энергия j -го компонента, Дж.

Значения ΔH_j и e_j приведены в научной и справочной литературе [89].

Учитывая все рассмотренные, суммарную энергию ОГ $E_{ог}$ (Дж) можно представить в виде суммы выходящих из цилиндра двигателя её составляющих ($Q_{ог}$, $E_{хим}$ и $E_{кин}$):

$$E_{ог} = Q_{ог} + E_{хим} + E_{кин}. \quad (4.9)$$

При прохождении через тепловой аккумулятор ОГ либо отдают часть своей теплоты $Q_{ог}^{ym}$ (при $T^* > T$), либо получают некоторое ее количество от рабочего тела ТА (при $T^* < T$), обуславливая процесс стабилизации температуры ОГ. Максимальное количество теплоты $Q_{ог}^{ym}$, Вт, которое может быть передано ТА потоком ОГ, условно (на предварительном этапе) определяется по формуле:

$$Q_{ог}^{ym} = G_{ог} \cdot c_{ог} \cdot (T^* - T) = H_{ог} - H_{ma}, \quad (4.10)$$

где H_{ma} – энтальпия рабочего тела ТА, Дж.

Тогда, теплота уходящих из ТА газов Q_{yg} , Вт, выразится как

$$Q_{yg} = Q_{ог} - Q_{ог}^{ym}. \quad (4.11)$$

Теплоту, запасенную ТА Q_{ma} , Вт, можно выразить как

$$Q_{ma} = m_{ma} \cdot c \cdot (T - T_{oc}) = H_{ma} - H_{oc}, \quad (4.12)$$

где m_{ma} – масса ТА, кг; c – теплоемкость ТА, Дж/(кг К); H_{ma} , H_{oc} – соответственно энтальпии рабочего тела ТА и окружающей среды, Дж.

Максимальное количество теплоты Q_{ma}^{\wedge} , Вт, которое может быть ТА возвращена потоку ОГ, определяется как:

$$Q_{ma} = m_{ma} c (T - T^*) = H_{ma} - H_{ог}. \quad (4.13)$$

Следовательно теплота, не возвращенная ТА потоку ОГ Q_{ma}^* , Вт, выразится в виде:

$$Q_{ma}^* = Q_{ma} - Q_{ma}^{\wedge}. \quad (4.14)$$

Кроме того (при $T^* < T$), вследствие термического воздействия некоторые компоненты ОГ, проходя через ТА, участвуют в химических реакциях с выделением теплоты. В результате энергия химических компонентов трансформируется в термическую и уходящие ОГ из ТА содержат меньшее количество химической энергии, чем ОГ, вышедшие из цилиндра двигателя, но большее количество тепловой энергии.

В результате изменения количества энергии рассматриваемого потока продуктов сгорания его структура подвергнется изменениям в зависимости от отношения значений T^* и T :

$$\text{при } T^* > T \quad E_{yz} = Q_{oz} - Q_{oz}^{ym} + E_{хим} + E_{кин}; \quad (4.15)$$

$$\text{при } T^* < T \quad E_{yz}^{\wedge} = Q_{oz}^{\wedge} + Q_{ma} + E_{хим} + E_{кин}. \quad (4.16)$$

Описанный энергетический баланс (по формулам 4.15 и 4.16) представлен графически на рис. 4.2 и рис. 4.3 суммой полос.

В соответствии с реальной ситуацией, когда переданная ТА теплота превращается во внутреннюю энергию теплоаккумулирующего материала U_{pm} , при обратном процессе теплопередачи часть этой энергии переходит в тепловую Q_{ma} .

Очевидно, что из перечисленных составляющих энергии ОГ использовать (утилизировать) для обеспечения стабилизации температуры потока ОГ наиболее полно можно лишь энергию теплового потока Q_{oz} . Проанализируем ее более подробно.

4.3. Физическое моделирование процесса стабилизации температуры отработавших газов

Рассмотрим возможность использования энергии Q_{oz} для стабилизации температуры потока отработавших газов ПДВС посредством ТА. Допустим, что наименьшая температура, при которой эффективно функционирует каталитический нейтрализатор T^n , а наибольшая – T^m . Тогда, процесс стабилизации температуры потока ОГ, реализуемый в установке, на рис. 4.4 и рис. 4.5 изобразится совокупностью процессов $a-b$ и $c-d$. Соответственно, $a-b$ – изобарный процесс теплообмена ОГ в выпускной системе ($P = idem$), $c-d$ – изохорный процесс теплообмена ТА в замкнутом объеме ТА. Для описания процесса тепловой стабилизации в ТА рассмотрим две ситуации $T^* > T$ (рис. 4.4) и $T^* < T$ (рис. 4.5).

При $T^* > T$ температура отработавших газов T^* на $a-b$ соответствует точке a . Соответственно теплота, выбрасываемая с ОГ в окружающую среду Q_{oz} , эквивалентна площади $a-b-5-9$. Тепловой аккумулятор имеет температуру $T > T^*$, за счет запаса теплоты (накопленного в предшествующий период в виде U_{pm}), равного площади $c-m-7-6$. В процессе теплопередачи часть теплоты ОГ эквивалентна площади $a-k-8-9$ Q_{oz}^{ym} , обуславливая изменение его внутренней энергии на величину ΔU_{pm} , эквивалентную площади $7-m-m'-7'$. Температура ТА повышается от T до T' . Другая часть теплоты ОГ (Q_{yz} , площадь $b-k-8-5$), выходя из ТА (обладает меньшим значением термического потенциала), попадает в КН. С учетом нестационарности процесса теплопередачи запас энергии ТА постоянно возрастает ($m' \rightarrow d$). Кроме того, температура T_{yz} также имеет тенденцию увеличения (перемещение точки k в k' [T_{yz}']): ($k \rightarrow a$), по причине уменьшения градиента температур T^* и T .

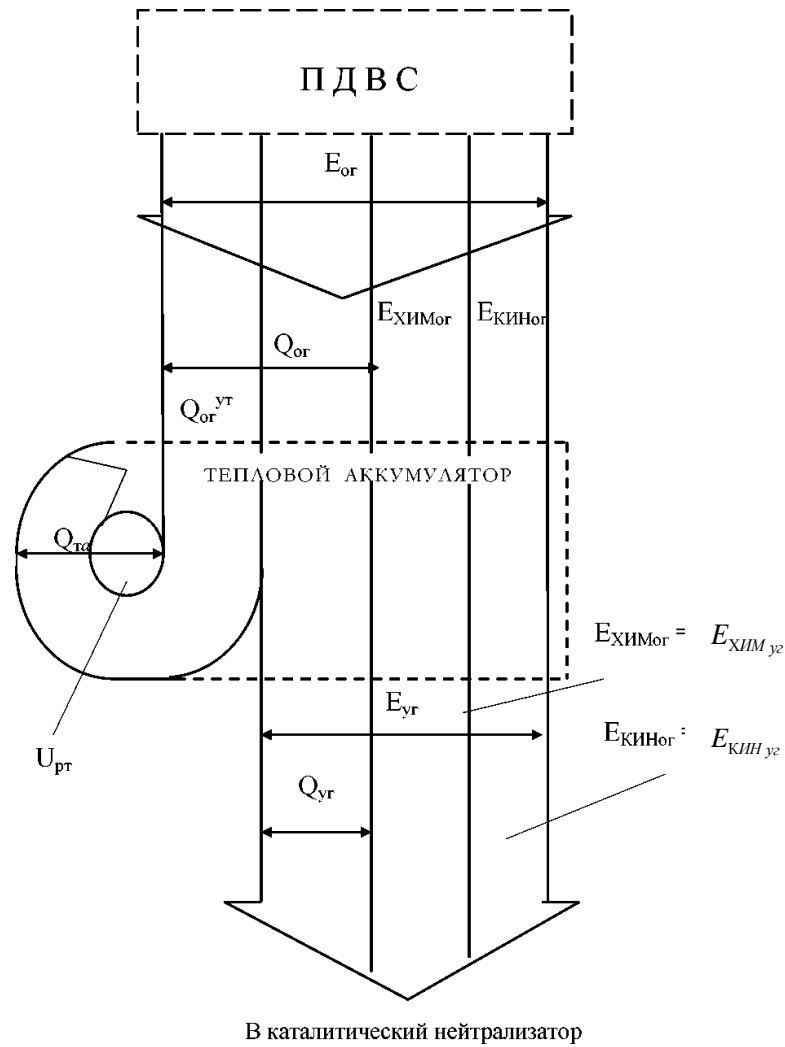


Рис. 4.2. Структура изменения энергии потока обработавших газов в процессе передачи теплоты от него к теплому аккумулятору соответственно расчетам по формуле 4.16

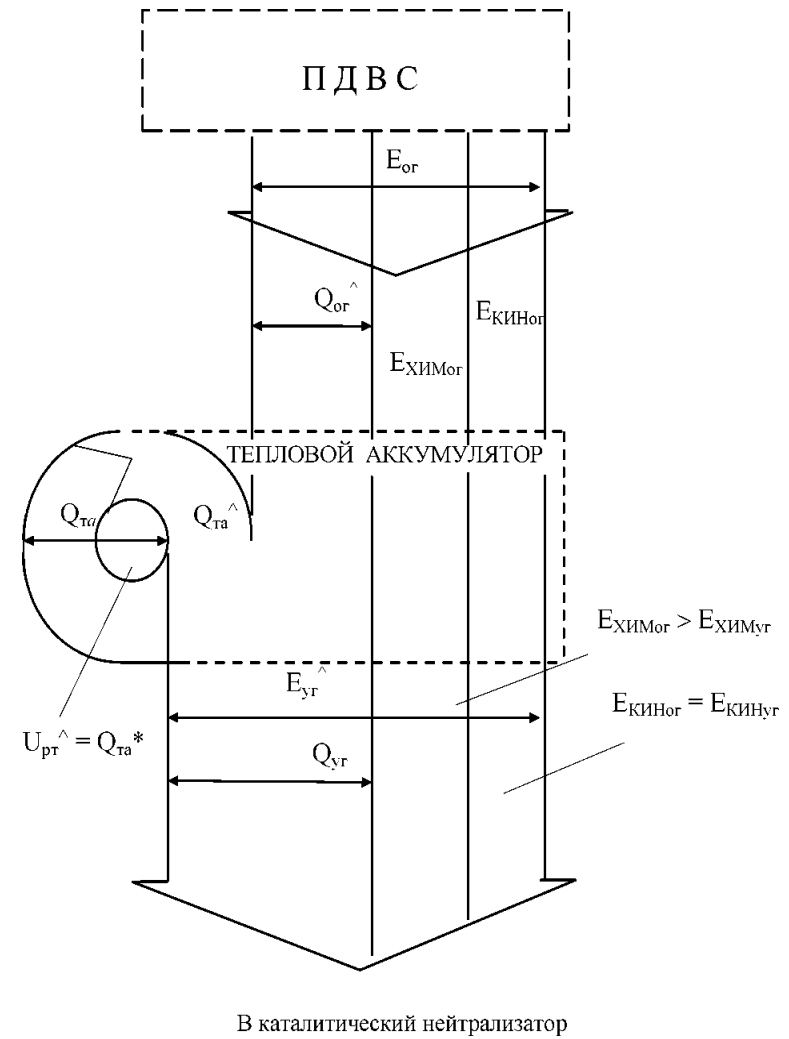


Рис. 4.3. Структура изменения энергии потока обработавших газов в процессе передачи ему теплоты тепловым аккумулятором соответственно расчетам по формуле 4.16

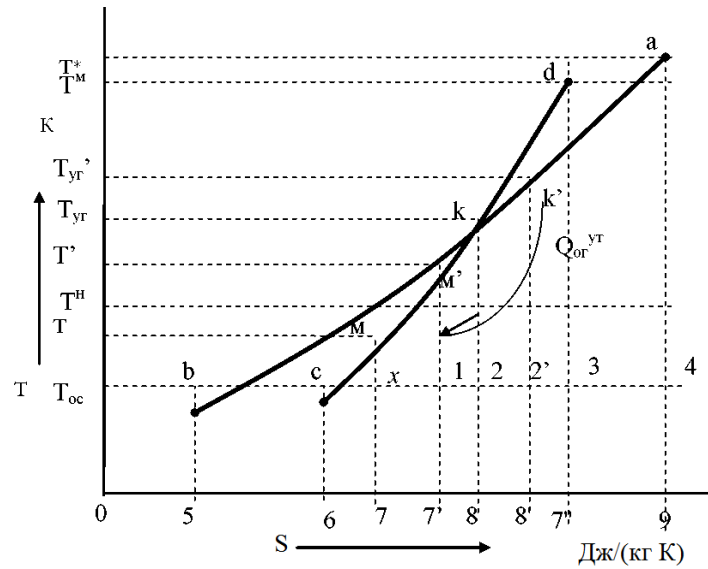


Рис. 4.4. Процесс температурной стабилизации обработавших газов в выпускной системе с тепловым аккумулятором (при $T^* > T$)

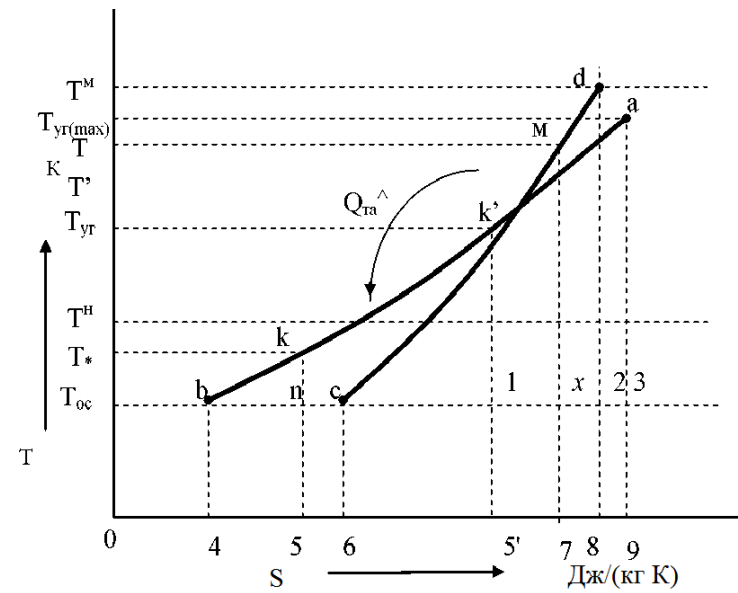


Рис. 4.5. Процесс температурной стабилизации обработавших газов в выпускной системе с тепловым аккумулятором (при $T^* < T$)

В случае, когда $T^* < T$, теплота Q_{oz} , эквивалентная площади $k-b-4-5$, выбрасывается с ОГ в окружающую среду. Тепловой аккумулятор обладает запасом энергии (накопленной в предшествующий период в виде U_{pm}), равной площади $c-d-2$. В процессе теплопередачи часть теплоты ТА Q_{ma} , эквивалентная площади $7-m-d-8$, передается потоку ОГ, увеличивая термический потенциал уходящих из ТА отработавших газов на величину, эквивалентную площади $5-k-k'-5'$, который становится равным Q_{ye} (площадь $4-b-k'-5'$).

Учитывая нестационарность процесса теплопередачи, стоит отметить, что запас энергии в ТА постоянно снижается ($m \rightarrow c$). Следовательно, температура T_{ye} также имеет тенденцию дальнейшего снижения ($k' \rightarrow b$). Точки k и m , соответствующие температурам T_{ye} и T , в процессе стабилизации температуры является «плавающими». В зависимости от температур T^* и T , температура ОГ T_{ye} может находиться в диапазоне от T'' до T''' .

Изложенные выше соображения целесообразно рассмотреть применительно к интересующему нас участку системы выпуска, характеризующему изменения температурного режима работы КН при установке ТА (рис. 4.6).

На графике рис. 4.6 показано изменение температуры ОГ в зависимости от теплового состояния элементов выпускной системы. Отрезок 1' и 1'' характеризует тепловое состояние потока ОГ, выходящих из выпускного коллектора (от T^* до T'''). Отрезки 2'-3' и 2''-3'' характеризуют тепловое состояние ТА в зависимости от температуры ОГ, образуя рабочий диапазон температур ТА.

Изменение температурного потенциала ОГ в ТА приводит к сужению температурного диапазона режима работы КН с $4x'-4x''$ ($5x''-5x'$) (при штатной комплектации) до площади $4'-4''$ ($5''-5'$).

Следует отметить, что цифровые индексы от 5 до 9 (рис. 4.4), от 4 до 9 (рис. 4.5) и от 1 до 5 (рис. 4.6) характеризуют абсолютные значения рассматриваемых величин. Таким является изменение структуры энергии потока ОГ в выпускной системе, оборудованной ТА.

Несмотря на разнообразие типов ТА, наиболее приемлемыми для применения на образцах АТ являются кожухотрубные установки. Поэтому дальнейшее рассмотрение относится к устройствам подобного типа.

Задача описания процесса стабилизации температуры потока ОГ в ТА, установленным в систему выпуска ПДВС, связана с необходимостью приближенного аналитического решения одномерной задачи теплового баланса при нестационарной теплопроводности для многослойных и составных элементов конструкции, постоянными в пределах каждого слоя теплофизическими параметрами и изменяющимися во времени граничными воздействиями.

Расчет температурных полей в составных элементах конструкции ТА сводится к решению краевых задач теплопроводности для областей с кусочно-однородными средами. В этом случае для искомой функции наряду с условиями на границе рассматриваемой области должны выполняться условия сопряженности сред. Если, к тому же, взаимодействие элементов конструкции с окружающей средой носит сложный характер, то применение классических методов связано с большими математическими трудностями, а при использовании методов Ритца или Галеркина необходимо уметь строить функции, точно удовлетворяющие неоднородным граничным условиям и системы базисных функций, что практически невозможно для многих реальных задач. Метод Эйлера при решении дифференциального уравнения позволяет в ряде случаев преодолеть эти трудности, т.к. при его использовании в состав решения включают неопределенные функции одной из независимых переменных, а постоянные интегрирования определяются из краевых условий третьего рода на внешних поверхностях и условий сопряжения на внутренних поверхностях в результате решения трех алгебраических уравнений. По методу Эйлера на промежутке $[T_0, b]$ необходимо найти частное решение $T_2 = f(T, \tau)$. Для этого необходимо конкретизировать шаг h , и точки деления T_i найдутся по формуле: $T_i = T_0 + ih$, ($i = 0, 1, \dots, n$).

Применение предложенного подхода для исследования нестационарного теплового состояния ТА рассмотрим на примере краевых задач его заряда и разряда.

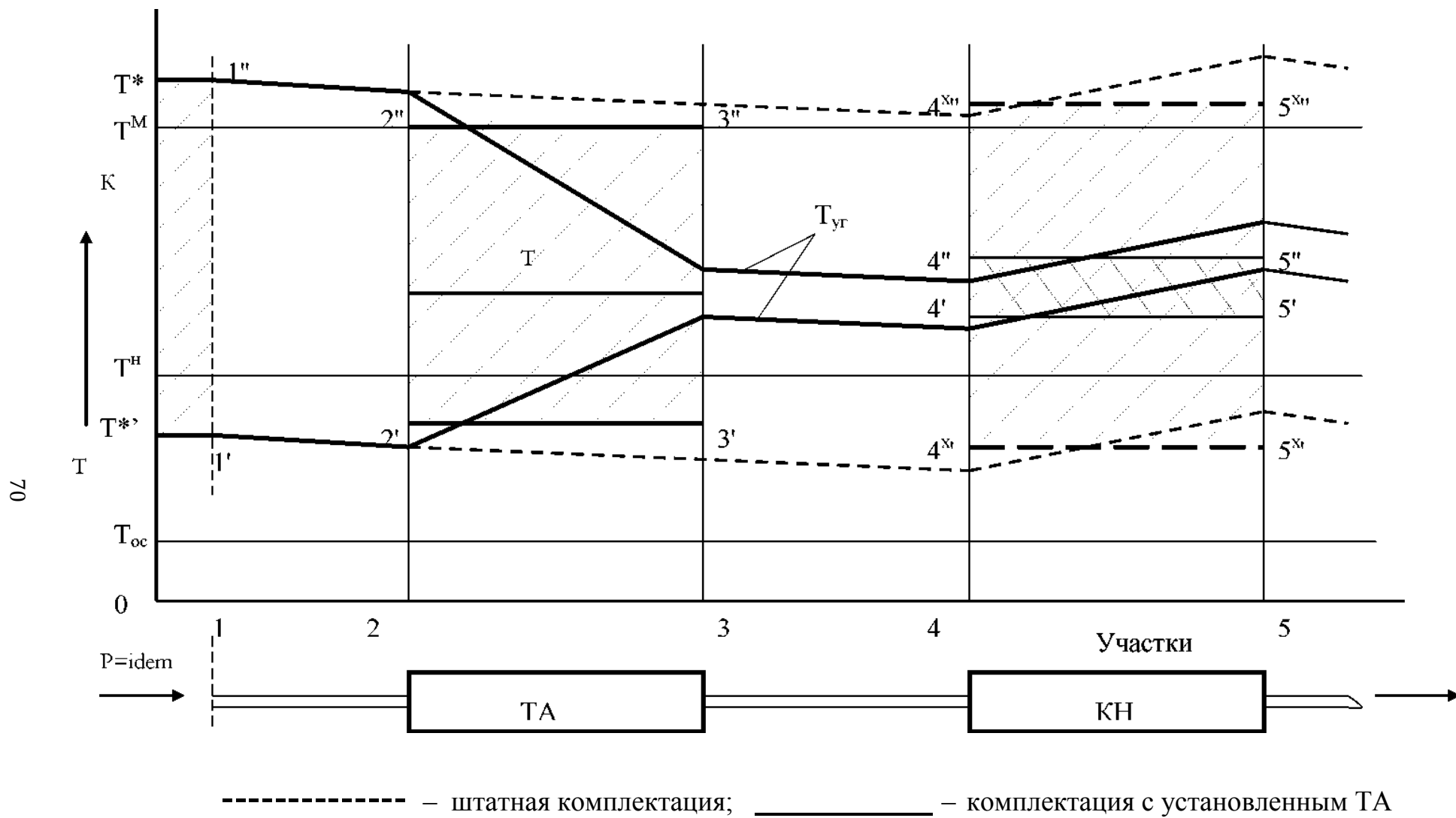


Рис. 4.6. Изменение теплового состояния потока ОГ и элементов системы выпуска при установке в нее ТА

4.4. Математическое моделирование процесса стабилизации температуры в тепловом аккумуляторе с фазовым переходом

4.4.1. Тепловое состояние теплового аккумулятора при заряде

На начальном этапе методически целесообразно рассмотреть более простую модельную задачу имеющую, однако, достаточно широкое практическое приложение. В данном случае, нагрев ТА происходит с помощью потока ОГ, расход и температура которого заданы. Применяв допущения об отсутствии конвективной составляющей по фронту плавления [54; 62], линейный коэффициент теплопередачи многослойной цилиндрической стенки \bar{k} , Вт/(м К), с граничными условиями третьего рода (рис. 4.7) можно выразить в виде:

$$\bar{k} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} + \frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_3}{d_x}}, \quad (4.17)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от ОГ к стенке и от стенки к жидкой фазе ТА соответственно, Вт/(м² К); λ_2 и λ_4 – теплопроводности стенки и твердой фазы ТАМ, Вт/(м К); d_1 , d_2 , d_x и d_3 – диаметры внутренней и наружной поверхностей стенки, поверхности фазового перехода и наружного ТАМ, м.

Частным случаем (4.17) является уравнение, описывающее линейный коэффициент теплопередачи ТАМ, прибывающего только в твердой фазе. При этом $d_x = d_2$, следовательно (4.17) примет вид:

$$\bar{k} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}. \quad (4.18)$$

Когда ТАМ находится только в жидкой фазе $d_x = d_3$, линейный коэффициент теплопередачи можно выразить как:

$$\bar{k} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}. \quad (4.19)$$

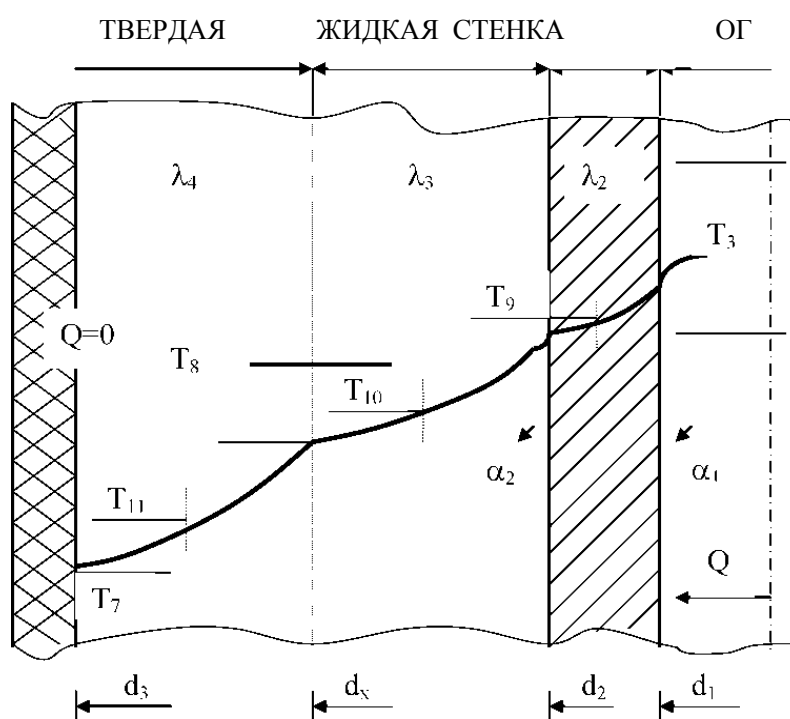


Рис. 4.7. Заряд теплового аккумулятора

Как свидетельствует ряд авторов [55], при пассивном теплообмене и малых диаметрах поверхности теплопередачи в ТА рассматриваемой конструкции, процесс теплопередачи определяется главным образом теплопроводностью. Поэтому в ряде случаев допустима интерпретация:

$$\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_x}{d_2}, \quad (4.20)$$

где λ_3 – теплопроводность жидкой фазы ТАМ, Вт/м К.

Теплоемкость теплового аккумулятора \hat{c} , Дж/(кг К), без учета пограничного слоя фазового перехода, можно выразить как удельную для системы [59]:

$$\hat{c} = \frac{c_2 \cdot m_2 + c_3 \cdot m_3 + c_4 \cdot (m_5 - m_3)}{m_6}, \quad (4.21)$$

где c_2 , c_3 и c_4 – теплоемкости стенки, жидкой фазы и твердой фазы соответственно, Дж/(кг К); m_2 , m_3 , m_5 и m_6 – массы стенки, жидкой фазы, ТАМ и ТА, кг.

С учетом фазового перехода массу m_3 жидкой фазы (4.21) можно выразить как:

$$m_3 = \rho_3 \cdot \frac{\pi \cdot l}{4} \cdot (d_x^2 - d_2^2), \quad (4.22)$$

где ρ_3 – плотность жидкой фазы ТАМ, кг/м³; l – длина трубопровода ТА, м.

Уравнение (4.20) достаточно точно описывает теплоемкость системы (ТС) при наличии в ТАМ одной из фаз.

Таким образом, четко прослеживается зависимость \bar{k} и \hat{c} от d_x . Воспользовавшись линейным коэффициентом теплопроводности для многослойной цилиндрической стенки, на участке d_3 – d_x линейный коэффициент теплопроводности k_u , Вт/(м К), (рис. 4.7) справедливо записать:

$$k_u = \frac{1}{\frac{l}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_3}{d_x}}. \quad (4.23)$$

На режиме заряда местоположение фазового перехода определяется температурой плавления ТАМ. Тепловой поток, проходящий через этот участок выражается как:

$$Q = k_u \cdot \pi \cdot l \cdot (T_6 - T_7), \quad (4.24)$$

где T_6 – температура плавления ТАМ, К;

T_7 – внутренняя краевая температура ТАМ (по диаметру d_3), К.

Подстановка (4.23) в (4.24) позволяет выполнить следующие преобразования:

$$Q = \frac{\pi \cdot l \cdot (T_6 - T_7)}{\frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_3}{d_x}}; \quad \ln \frac{d_3}{d_x} = \left[\frac{\pi \cdot l \cdot (T_6 - T_7)}{Q} \right] \cdot 2\lambda_4 \quad \text{и} \quad d_x = \frac{d_3}{e^A}, \quad (4.25)$$

$$\text{где } A = \left[\frac{\pi \cdot l \cdot (T_6 - T_7)}{Q} \right] \cdot 2\lambda_4.$$

Уравнение (4.25) описывает местоположение фазового перехода при заряде с учетом изменения температурного поля ТА.

Систему уравнений (4.11–4.14) с учетом (4.17), (4.21) и (4.24) для заряда можно записать:

$$m_6 \cdot \bar{c}_i \cdot \frac{dT_s}{dt} = Q \quad \text{при } T_8 = T_7 = T'_o; \quad (4.26)$$

$$Q = c_1 \cdot G_1 \cdot (T_1 - T_{2i}) = \bar{k}_i \cdot l \cdot \pi \cdot l \cdot \left(\frac{T_1 + T_{2i}}{2} - T_{7i} \right), \quad (4.27)$$

где T'_o – начальная среднеобъемная температура ТАМ, К; \bar{c}_i – теплоемкость ТА на фазовом переходе ($\hat{c} = \hat{c}$ – в отсутствии фазового перехода), Дж/(кг К).

Вводя обозначение $\omega_i = \bar{k}_{i-1} \cdot \pi \cdot l / c_1 \cdot G_1$ (по терминологии Е.Я. Соколова [59] ω может быть назван режимным коэффициентом ТА), на основании (4.27) получим:

$$T_1 - T_{2i} = \omega_i \cdot \left(\frac{T_1 + T_{2i}}{2} - T_{7i} \right). \quad (4.28)$$

Решение (4.28) относительно T_{2i} , К позволяет получить выражение:

$$T_{2i} = T_1 \cdot \frac{2 - \omega_i}{2 + \omega_i} + T_{7i} \cdot \frac{2\omega_i}{2 + \omega_i}. \quad (4.29)$$

Подстановка (4.29) в правую часть (4.27) позволяет выразить тепловой поток, как:

$$Q_i = \frac{2 \cdot \bar{k}_{i-1} \cdot \pi \cdot l}{2 + \omega_i} \cdot (T_1 - T_{7i}). \quad (4.30)$$

Уравнение теплового баланса (4.27) с учетом (4.26) будет иметь вид:

$$m_6 \cdot \bar{c}_{i-1} \cdot \frac{dT_8}{d\tau} = \frac{2 \cdot \bar{k}_{i-1} \cdot \pi \cdot l}{2 + \omega_{i-1}} \cdot (T_1 - T_{7i}). \quad (4.31)$$

При плавлении ТАМ часть энергии теплового потока затрачивается на разрушение кристаллической решетки. Следовательно, дополнительно затрачивается теплота B_i , Дж

$$B_i = H \cdot m_{7i}, \quad (4.32)$$

где H – теплота плавления ТАМ, Дж/кг; m_{7i} – масса ТАМ находящегося в фазе плавления, кг.

В свою очередь, значение m_7 можно определить из уравнения

$$m_{7i} = m_{3i} - m_{3i-1}. \quad (4.33)$$

Решая (4.31), с учетом (4.32) получим приращения τ_i , с, при изменении температуры T_{7i}

$$\tau_i = \frac{\hat{c}_i \cdot m_6 \cdot dT_8 + B_i}{Q_i}. \quad (4.34)$$

С учетом (4.31) и (4.34) определим теплоемкость ТА на фазовом переходе:

$$\bar{c}_i = \frac{Q_i \cdot d\tau}{m_6 \cdot dT_8}. \quad (4.35)$$

Уравнениями (4.17) и (4.26) описывается температурное поле ТА, а следовательно, дается возможность определить температуры как граничных точек, так и средних слоев (стенка, жидкая и твердая фазы ТАМ). Выразить среднюю температуру слоев в ходе плавления ТАМ можно:

для стенки T_{9i} , К:

$$T_{9i} = T_{3i} - \frac{Q_i}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{(d_2 + d_1) \cdot d_1}{2}} \right) \cdot \pi \cdot l}; \quad (4.36)$$

для жидкой фазы ТАМ T_{10i} , К

$$T_{10i} = T_{3i} - \frac{Q_i}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \right) \cdot \pi \cdot l}; \quad (4.37)$$

для твердой фазы ТАМ T_{11i} , К

$$T_{11i} = T_{3i} - \frac{Q_i}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} + \frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{(d_3 + d_{xi}) \cdot d_{xi}}{2}} \right) \cdot \pi \cdot l}. \quad (4.38)$$

При известных средних температурах слоев среднеобъемную температуру ТА T_{8i} , К, можно определить

$$T_{8i} = \frac{T_{9i} \cdot m_2 + T_{10i} \cdot (m_5 - m_{3i}) + T_{11i} \cdot m_{3i}}{m_6}. \quad (4.39)$$

Таким образом, частное решение (4.29) и (4.31) уравнения теплового баланса является основой описания процесса стабилизации температуры в ТА при его заряде.

4.4.2. Тепловое состояние теплового аккумулятора при разряде

По аналогии с преобразованиями, выполненными в предыдущем подразделе 4.4.1, для режима разряда уравнение линейного коэффициента теплопередачи примет вид:

$$\bar{k} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_x}{d_2} + \frac{1}{\alpha'_2 \cdot d_2}}. \quad (4.40)$$

где α'_1 и α'_2 – коэффициенты теплоотдачи от стенки к ОГ и от жидкой фазы ТАМ к стенке, Вт/(м²К).

Особенностью (4.40) является то, что с началом формирования твердой фазы на поверхности стенки конвективная составляющая α'_2 исчезает (рис. 4.8), при этом $d_2 \rightarrow d_x \rightarrow d_3$. Нахождение коэффициента теплопроводности как частной системы для пребывания ТАМ только в жидкой или только твердой фазе аналогично заряду и сводится к решению (4.18) и (4.19).

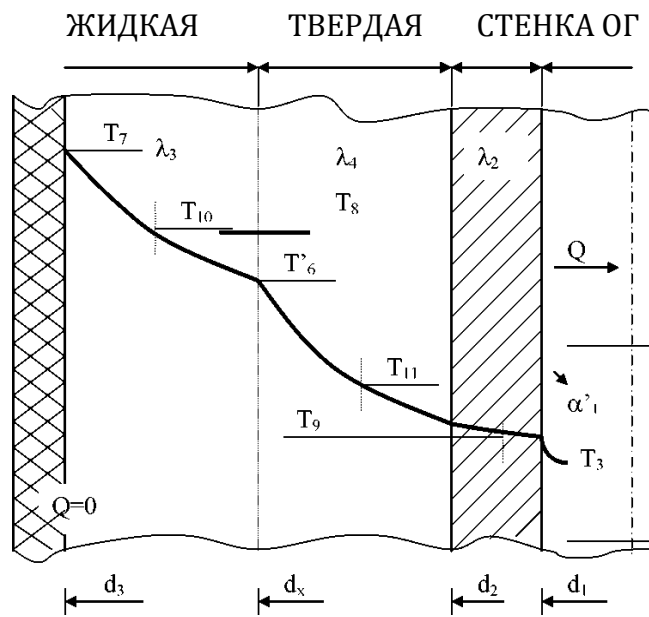


Рис. 4.8. Разряд теплового аккумулятора

Кроме того, не меняется выражение теплоемкости, определяемое по (4.21). Однако уравнение массы жидкой фазы примет вид:

$$m_3 = \rho_3 \cdot \frac{\pi \cdot l}{4} \cdot (d_3^2 - d_x^2). \quad (4.41)$$

Воспользовавшись линейным коэффициентом теплопроводности для многослойной цилиндрической стенки, при разряде на участке $d_l - d_x$ (рис. 2.8) можно записать:

$$k_{л} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_x}{d_2}}. \quad (4.42)$$

На режиме заряда местоположение фазового перехода определяется температурой кристаллизации ТАМ. Тепловой поток, проходящий через этот участок, выражается как

$$Q = k_n \cdot \pi \cdot l \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T'_6 \right), \quad (4.43)$$

где T'_6 – температура кристаллизации ТАМ, K .

Подстановка (4.42) в (4.43) позволяет выполнить преобразования, аналогичные заряду, и получить

$$d_x = d_2 \cdot e^A, \quad (4.44)$$

где
$$A = \left[\frac{\pi \cdot l \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T'_6 \right)}{Q} - \frac{1}{\alpha'_1 \cdot d_1} - \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \right] \cdot 2\lambda_4.$$

Уравнение (4.44) описывает местоположение фазового перехода при разряде с учетом изменения температурного поля ТА.

Систему уравнений (4.11–4.14) с учетом (4.40), (4.21) и (4.44) для разряда можно записать

$$m_6 \cdot \bar{c} \cdot \frac{dT_8}{d\tau} = Q \quad \text{при } T_8 = T_7 = T''; \quad (4.45)$$

$$Q = c_1 \cdot G_1 \cdot (T_{2i} - T_1) = \bar{k}_{i-1} \cdot \pi \cdot l \cdot \left(T_{7i} - \frac{T_1 + T_{2i}}{2} \right), \quad (4.46)$$

где T'' – начальная среднеобъемная температура ТАМ при разряде, K .

В результате преобразования (4.46) относительно T_2 , имеем:

$$T_{2i} = T_{8i} \cdot \frac{2 - \omega_i}{2 + \omega_i} + T_1 \cdot \frac{2\omega_i}{2 + \omega_i}. \quad (4.47)$$

Подстановка (4.47) в правую часть (4.46) позволяет выразить тепловой поток, как:

$$Q_i = \frac{2 \cdot \bar{k}_{i-1} \cdot \pi \cdot l}{2 + \omega_i} \cdot (T_{7i} - T_1). \quad (4.48)$$

Уравнение теплового баланса (2.46) с учетом (2.48) будет иметь вид

$$m_6 \cdot \bar{c}_i \cdot \frac{dT_8}{d\tau} = \frac{2 \cdot \bar{k}_{i-1} \cdot \pi \cdot l}{2 + \omega_i} \cdot (T_{7i} - T_1). \quad (4.49)$$

Время разряда и теплоемкость ТА на фазовом переходе находятся по уравнению (4.34) и (4.35), а уравнения температур (4.36) и (4.39) справедливы и для разряда ТА (с учетом изменения знака после T_3). Однако составляющие (4.39) выражения средних температур слоев (4.37) и (4.38) изменяются следующим образом:

для твердой фазы T_{11i} , K :

$$T_{11i} = T_{3i} + \frac{Q_i}{\left(\frac{1}{\alpha'_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{(d_{xi} + d_2) \cdot d_2}{2} \right)} \cdot \pi \cdot l, \quad (4.50)$$

для жидкой фазы T_{10i} , K :

$$T_{10i} = T_{3i} + \frac{Q_i}{\left(\frac{1}{\alpha'_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_{xi}}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \cdot \ln \frac{(d_3 + d_{xi}) \cdot d_{xi}}{2} \right)} \cdot \pi \cdot l. \quad (4.51)$$

Следовательно, частное решение (4.47) и (4.49) уравнения теплового баланса является основой описания процесса стабилизации температуры в ТА при его разряде.

В общем случае расход ОГ и их входная температура T_1 являются функциями времени, задаваемыми условиями однозначности или определяемыми совместным описанием теплового состояния ТА и потока ОГ в выпускной системе ПДВС. Следует отметить, что однозначное задание температуры начала заряда T'_o и его окончания T''_o (начало разряда) в рамках (4.26–4.27) и (4.45–4.46) возможно при формулировке оптимизационной задачи, определяемой условиями эффективного функционирования КН. Кроме того, предлагаемая математическая модель, при конструктивной проработке теплообменника, способна решить задачу по определению массогабаритных параметров ТА. В этом случае обязательными начальными условиями являются минимальная температура T_2 или время окончания процесса (заряда или разряда).

Анализируя полученные выражения (4.17) и (4.40), можно констатировать снижение коэффициента теплопередачи при разряде ТА, объясняемое уменьшением α_1 при разряде. Поведение α_2 несколько сложнее, оно достаточно точно описано в работах [32; 52] и не является предметом детального рассмотрения. Кроме того, хорошо прослеживается влияние конструктивных особенностей поверхности теплообмена на характер процесса теплопередачи в ТА.

Большое значение при расчетах имеет вопрос выбора исходных данных, требующих детального анализа параметров потока ОГ в реальных условиях эксплуатации ПДВС.

Помимо определения основных параметров ТА, приведенные формулы позволяют проанализировать временной ход режимных параметров. Это осуществимо путем конкретизации интервала варьирования τ . Программа расчета выполнена в программной среде MATCAD 2000 с использованием алгоритма математического моделирования процесса стабилизации температуры потока ОГ в ТА для системы выпуска ПДВС.

4.5. Обстоятельства уменьшения негативного влияния загрязнения атмосферы крупных городов

Для выхода страны на мировые стандарты благосостояния требуется резкое увеличение эффективности использования всех видов топливно-энергетических ресурсов [157].

Сильнее всего атмосферу российских городов отравляют электроэнергетика, цветная и чёрная металлургия, нефтедобыча и нефтепереработка, угольная, газовая промышленность, а также машиностроение. В загрязнение атмосферы России наибольший «вклад» (свыше 58 % от совокупного объёма эмиссии вредных веществ) приходится на Уральский и Сибирский федеральный округа, преимущественно с промышленных предприятий черной и цветной металлургии в результате их антропогенной деятельности. Наряду с вышеобозначенными основными источниками загрязнения окружающей среды в крупных городах свой дополнительный «вклад» вносит автомобильный транспорт, количество которого непрерывно растёт.

В свете такого обстоятельства важное значение в уменьшении негативного влияния загрязнения атмосферы выбросами промышленного предприятия принадлежит инновационным разработкам энергосберегающих технологий и оборудования, эффективность которых зависит от успешной реализации проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ, разработок программного обеспечения информационно-коммуникационных технологий, обучения и переподготовки специалистов, отвечающих современным требованиям [134–162]. Как показали многочисленные исследования последних лет, частицы размером менее 100 нм (наночастицы) придают сделанным из них материалам новые свойства, а нанобъекты демонстрируют новое физическое и химическое поведение, зависящее от размера частиц (размерные эффекты). В качестве наноразмерных наполнителей используют углеродные наноструктуры высшего порядка с переходными формами углерода: фуллерены (недавно открытая природная форма углерода, существующая наряду с уже хорошо известными – графитом, алмазом и карбином), фуллериты (фуллерены в кристаллическом состоянии), астралены (фуллероидные многослойные углеродные наночастицы) и другие кластеры (рис. 4.9).

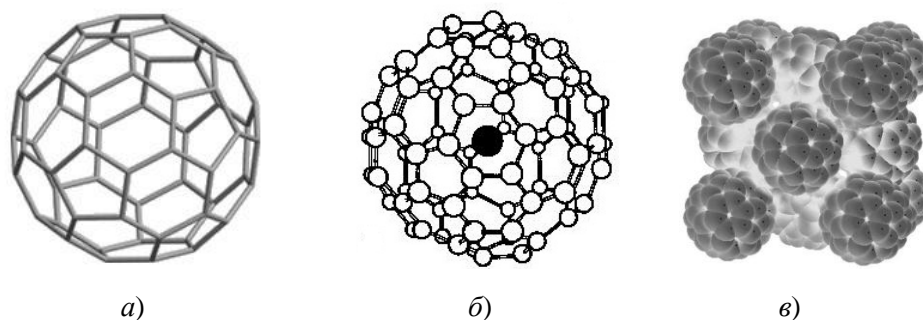


Рис. 4.9. Фуллерен C_{60} (а), эндофуллерен (б) и фуллерит (в) [163]

Молекулы эндофуллерены (рис. 4.9 б), в которых внутри молекулы фуллерена размещен один или несколько неуглеродных атомов, составляют основу наночастиц, придающих сделанным с их использованием материалам новые свойства. Порошки с наночастицами железа сферической формы используют в качестве присадок моторных масел двигателей внутреннего сгорания, устраняющих микродефекты и восстанавливающих детали шатунно-поршневой группы, повышающих компрессию в двигателе в 1,1–1,3 раза, снижающих токсичность и дымность выхлопных газов благодаря образованию на поверхности деталей тонких (толщиной менее 1 мкм) слоев нанопористого катализатора. Наноразмерные (размер: 2–17 нм, удельная поверхность: 40–100 м²/г) частицы металлов платиновой группы (Pt, Pd, Ru) служат высокоэффективными многокомпонентными катализаторами в электрохимических системах с твердым полимерным электролитом.

Крупнейшим потребителем наночастиц стала сфера энергетики (использование как основы для батарей, топливных элементов, в качестве присадки для топлива и др.).

Выводы

В результате расчетно-аналитического исследования определен температурный диапазон, позволяющий наиболее полно реализовать потенциал очистки ОГ от вредных веществ в КН с платиновым покрытием блочного типа, лежащий в пределах от 573 до 723 К.

Выполненное теоретическое исследование выявило целесообразность использования тепловой энергии ОГ посредством ТА для повышения эффективности работы КН.

Разработка и практическая реализация приближенного аналитического решения задач теплового баланса при заряде и разряде ТА с фазовым переходом позволяют выполнить моделирование процесса стабилизации температуры потока отработавших газов на входе в каталитический нейтрализатор ПДВС. Построенная модель содержит лишь конструктивные и режимные параметры, позволяющие определять временной ход режимных параметров процесса в различных условиях эксплуатации АТ. Вместе с тем разработанный алгоритм и программное обеспечение решают задачу упрощенного расчета процесса стабилизации температуры потока ОГ в тепловом аккумуляторе системы выпуска ПДВС.

На основании вышеизложенного материала определены направления экспериментальных исследований: исследование процесса теплопередачи в ТА на режимах заряда и разряда с целью проверки адекватности математической модели процесса стабилизации температурного режима работы КН; исследование влияния процесса стабилизации температуры потока ОГ на эффективность работы КН при ездовых испытаниях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях возрастающего дефицита природных ископаемых энергоресурсов разработка новых экономичных и технически более совершенных силовых установок является необходимой реальностью развития автомобильной техники. Ухудшающаяся экологическая обстановка, особенно в крупных городах-мегаполисах, за счет значительно возросшего количества автомобилей, в том числе с дизелями, требует принятия срочных эффективных мер по снижению содержания вредных веществ в отработавших газах автомобильной техники.

В настоящей работе рассмотрены ряд направлений. Эти проблемы могут быть решены для уже находящихся в эксплуатации дизелей путем установки каталитических нейтрализаторов в сочетании с одновременной подачей в них воздуха и утилизацией теплоты уходящих из нейтрализатора газов утилизационной установкой на базе двигателя Стирлинга с целью получения дополнительной мощности.

Задача получения работы из теплоты отработавших газов может быть решена с помощью ряда утилизационных систем, среди которых на автомобильной технике перспективны паросиловые установки и термоэлектрогенераторы. Весьма эффективными системами, согласно анализу, выполненного профессором В.С. Кукисом, являются теплоутилизационные системы на базе двигателя Стирлинга. Эти двигатели в настоящее время достигли достаточно высокого технического уровня и могут быть с успехом использованы в качестве утилизаторов теплоты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аборина, С.В. Роль автотранспорта в загрязнении атмосферного воздуха г. Челябинска / С.В. Аборина, Е.М. Бажов, Б.А. Сушко, В.В. Харунжин // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 11–14.
2. Автомобильные двигатели / под ред. М.С. Ховаха. – М.: Машиностроение, 1977. – 591 с.
3. Автотранспортные потоки и окружающая среда: учеб. пособ. для вузов / под ред. В.Н. Луканина. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 408 с.
4. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 284 с.
5. Атаур, Р. Применение легких добавок к утяжеленным топливам с целью снижения дымности и токсичности отработавших газов дизеля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. Атаур. – М.: Рос. ун-т. Дружбы народов, 1993. – 15 с.
6. Ашмарин, И.П. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов / И.П. Ашмарин, Н.Н. Васильев, В.А. Амбросимов. – Л.: Госуниверситет, 1975. – 77 с.
7. Бакунин, В.А. Состояние атмосферного воздуха и меры сокращения его загрязнения в Челябинской области (1988–2005 г.) / В.А. Бакунин, Р.П. Бахарева // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 3–11.
8. Белов, П.М. Двигатели армейских машин. Часть 2. Конструкция и расчет / П.М. Белов и [др.]. – М.: Воениздат, 1972. – 568 с.
9. Бикбулатов, И.Х. Программа мониторинга и оценки окружающей среды США / И.Х. Бикбулатов, В.М. Еришко, Д.В. Зейферт, П.П. Иванов. – Уфа, 1996. – 146 с.
10. Богданов, А.И. Расширение возможностей утилизации энергии отработавших газов дизеля в случае использования нейтрализаторов / А.И. Богданов // Сб. науч. трудов. – Челябинск: ЧВВАИУ, 1996. – Вып. 6. – С. 117–119.
11. Бойчук, М.В. Обеспечение экологической безопасности водителей и пассажиров от выброса вредных веществ / М.В. Бойчук // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: мат-лы междунауч.-техн. конф.-ии. – Челябинск: ЧВАИ, 1999. – 60 с.
12. Болдырев, И.В. О возможности радикального совершенствования экологического состояния воздушного бассейна больших городов на базе перехода к новому альтернативному моторному топливу – диметиловому эфиру / И.В. Болдырев, Т.Н. Смирнова // Двигателестроение, 1997. – № 4. – С. 39–41.
13. Большев, Л.Н. Теория вероятностей и математическая статистика / Л.Н. Большев. – М.: Наука, 1987. – 284 с.
14. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
15. Бояджиев, Д. Комплексная термозкологическая оценка теплотехнических систем и ее влияние на выбор оптимального варианта / Д. Бояджиев // Тр. Межд. конф. по пром. энергетике. – Бухарест, 1978. – С. 3–8.
16. Бродянский, В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа: монография / В.М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
17. Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения: коллективная монография / В.М. Бродянский, В.С. Фратшер, К.М. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
18. Брякотин, Э.И. Обработка результатов эксперимента при испытаниях дизелей внутреннего сгорания: учеб. пособ. / Э.И. Брякотин, А.С. Лоскутов. – Барнаул, 1990. – 90 с.
19. Бунов, В.М. Снижение содержания сажи в отработавших газах дизелей автотранспортных средств / В.М. Бунов и [др.] // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 21–22.

20. Бунова, Е.В. Снижение сажевого содержания в отработавших газах тракторного дизеля за счет улучшения условий смесеобразования и сгорания: дис... канд. техн. наук. / Е.В. Бунова. – Челябинск ЧГТУ, 1996. – 119 с.
21. Вагнер, В.А. Моделирование образования вредных веществ в цилиндре дизеля: учеб. пособие / В.А. Вагнер, Н.А. Иващенко, В.Ю. Русаков. – Барнаул, 1997. – 202 с.
22. Валеев, Д.Х. Двигатель КамАЗ 740.11–240 / Д.Х. Валеев // Грузовик. – 1997. – № 12. – С. 19–22.
23. Варшавский И.Л. Некоторые теоретические вопросы обеспечения малотоксичной работы автомобильных двигателей: тр. Республ. науч.-техн. конф. по проблемам развития автомобильного транспорта (14–17.10.1965 г.) / И.Л. Варшавский. – Ереван, 1966. – С. 166–192.
24. Варшавский, И.Л. Как обезвредить отработавшие газы автомобиля / И.Л. Варшавский, Р.В. Малов. – М.: Транспорт, 1968. – 127 с.
25. Воинов, А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях / А.Н. Воинов – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.
26. Гигиеническая оценка влияния промышленных выбросов бенз(а)пирена от основных цехов ЧЭМК на состояние качества воздушной среды в районе его размещения: Отчет по НИР. – Екатеринбург–Челябинск, 1995. – 85 с.
27. Гизаури, К.Ш. Фазы газораспределения и токсичность отработавших газов бензиновых двигателей / К.Ш. Гизаури, Д.Н. Джавахишвили, Г.Н. Бадришвили. – Тбилиси: Мецниерба, 1985. – 102 с.
28. Головчук, А. Снижение дымности дизелей // Автомобильная промышленность / А. Головчук. – 1984. – № 11. – С. 35–36.
29. Горская, Л.В. Математическая статистика с элементами теории планирования эксперимента / Л.В. Горская, В.Н. Пицнова. – Саратов: СПИ, 1975. – 103 с.
30. Горшков, А.М. Процессы в открытых термодинамических системах / А.М. Горшков, З.Н. Нестратова, А.Г. Подольский // Машиностроение. – 1987. – № 9. – С. 45–51.
31. Грехов, Л.В. Насос-форсунки с гидроимпульсным управлением иглой для дизелей с улучшенными экологическими показателями. Математическое моделирование и исследование процессов в ДВС. учеб. пособ. / Л.В. Грехов. под ред. В.А. Вагнера, М.А. Иващенко, В.Ю. Русакова. – Изд-во Алт. ГТУ – Барнаул, 1997. – 198 с.
32. Гуссерль, Э. Кризис европейских наук и трансцендентальная феноменология / Э. Гуссерль // Вопросы философии. – 1993. – № 7. – С. 136–176.
33. Данилов-Данильян, В.И. Окружающая среда между прошлым и будущим: Мир и Россия: Опыт эколого-экономического анализа / В.И. Данилов-Данильян [и др.]. – М.: 1994. – 133 с.
34. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд. перераб.– М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
35. Дмитриенко, В.Д. Пути снижения расхода топлива и токсичности автомобильных двигателей / В.Д. Дмитриенко, Г.М. Савельев. – М.: ИПКАП, 1981. – 91 с.
36. Драгунов, Г.Д. Оценка вредности выхлопных газов автомобилей в городских условиях / Г.Д. Драгунов, С.И. Лобунько // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 24–25.
37. Евдокимов, Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
38. Емельянов, В.Е. Бензины с улучшенными экологическими свойствами / В.Е. Емельянов, А.М. Данилов // Автомобильная промышленность. – 1996. – № 12. – С. 33–35.
39. Жигалин, О.И. Снижение токсичности автомобильных двигателей / О.И. Жигалин, П.Д. Лупачев. – М.: Транспорт, 1985. – 120 с.

40. Зайцев С.В. Оценка эффективности утилизационной установки // Исследование и методы повышения эффективности технической эксплуатации судовых энергетических установок: сб. науч. работ НИИВТ / С.В. Зайцев. – Новосибирск, 1984. – С. 109–114.
41. Заслонов, В.Г. Некоторые вопросы технико-экономической оценки совершенствования тракторных дизелей / В.Г. Заслонов, Б.Л. Арав, Е.А. Лазарев, А.В. Сидоренко // Тематич. сб. науч. трудов. – Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 127–132.
42. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
43. Звонов, В.А. Исследование возможностей уменьшения выделения окислов азота дизелем / В.А. Звонов, Е.И. Боженок, Л.С. Заиграев // Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомст. тематич. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища шк., 1976. – Вып. 23. – С. 95–101.
44. Звонов, В.А. Измерение дымности отработавших газов дизелей // Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомст. тематич. науч.-техн. сб./ В.А. Звонов, А.П. Дядин. – Харьков: Вища шк., 1974. – Вып. 19. – С. 93–98.
45. Звонов, В.А. Методика оценки достоверности результатов при исследовании токсичности отработавших газов дизелей / В.А. Звонов [и др.] Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомст. тематич. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища шк., 1976. – Вып. 23. – С. 102–108.
46. Звонов, В.А. Проблемы оценки дизеля как источника загрязнения окружающей среды дисперсным материалом / В.А. Звонов, Е.А. Симонова // Автостроение за рубежом, 2002. – № 2. – С. 4–8.
47. Звонов, В.А. Применение метода математического планирования эксперимента для оценки токсичности двигателя / В.А. Звонов, В.В. Фурса // Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомст. тематич. науч.-техн. сб. – Харьков: ХГУ, 1973. – Вып. 17. – С. 99–105.
48. Звонов, В.А. Влияние параметров впускного воздуха и противодавления выхлопу на состав отработавших газов дизеля / В.А. Звонов, В.В. Фурса, Е.И. Боженок // Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомст. тематич. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища шк., 1974. – Вып. 19. – С. 88–93.
49. Звонова, З.Т. Каталитическая нейтрализация выхлопных газов дизелей / З.Т. Звонова, В.И. Атрощенко, В.А. Звонов // Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомст. тематич. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища шк., 1974. – Вып. 20. – С. 153–159.
50. Зедгенидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгенидзе. – М.: Наука, 1978. – 260 с.
51. Игнатьев, Ю.В. Снижение расхода топлива автотранспортом в городах // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. / Ю.В. Игнатьев. – Челябинск, 2001. – С. 38–41.
52. Исследование загрязнения атмосферного воздуха под влиянием выбросов автотранспорта на основных автомагистралях города Челябинска: Отчет по НИР. – Челябинск: Челяб. обл. центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. – 36 с.
53. Калиновский В.Н. Вторичное использование теплоты как резерв повышения топливной экономичности дизеля 10Д100 / В.Н. Калиновский // Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомст. тематич. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища шк., 1983. – Вып. 20. – С. 34–39.
54. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей / под ред. О.И. Жегалина, Н.А. Китросского [и др.] – М.: Транспорт, 1979. – 80 с.
55. Козлов, Ю.С. Экологическая безопасность автомобильного транспорта: учеб. пособ. для студентов автомобильных техникумов и колледжей / Ю.С. Козлов [и др.] – М.: Агар: Рандеву–АМ, 2000. – 175 с.
56. Колбенов, И.Л. Снижение токсичности и методы испытаний автотракторных двигателей / И.Л. Колбенов // Двигателестроение. – 1989. – № 7. – С. 57–58.

57. Константинов, В.М. Охрана природы / В.М. Константинов. – М: Издат. центр «Академия», 2000. – 240 с.
58. Костенко, Г.Н. Эксергетический анализ тепловых процессов и аппаратов / Г.Н. Костенко. – Одесса: ОПИ, 1964. – 32 с.
59. Котляров, В.И. Экологическая безопасность и возможные стратегии развития / В.И. Котляров, К.С. Лосев, В.Ф. Гракович // Известия РАН. 1991. – № 6. – С. 5–13.
60. Крутов, В.И. Система управления транспортным дизелем с регулированием угла опережения впрыскивания / В.И. Крутов и [др.] // Грузовик. – 1997. – № 12. – С. 26–30.
61. Кукис, В.С. Утилизационный двигатель с внешним подводом теплоты: Св-во на полезную модель. RU 21068 U1 7F 01 K 7/00 / В.С. Кукис [и др.] // Опубл. 20.12.2001. Бюл. №35.
62. Кукис, В.С. Свободнопоршневой паровой термоэлектрогенератор для утилизации теплоты отработавших газов ДВС. Св-во на полезную модель. Заявка № 2002113208/20(014137) / В.С. Кукис [и др.] // Решение о выдаче свидетельства от 14.08.2002.
63. Кукис, В.С. Возможность снижения токсичности двигателей внутреннего сгорания при утилизации теплоты их отработавших газов / В.С. Кукис, М.Л. Хасанова, Н.А. Пятковская // Праці Таврійськ. державн. агротехнічн. акад-я. – Вип. 2, Т. 17. – Мелітополь: ТДАТ, 2001. – С. 151–152.
64. Кукис, В.С. Повышение экологической безопасности двигателей мобильной техники / В.С. Кукис, М.Л. Хасанова // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог: сб. науч. тр./ МАДИ (ГТУ). М.: –2001. – С. 130–132.
65. Кукис, В.С. Зависимость эксергии отработавших газов ДВС от параметров окружающей среды / В.С. Кукис, Ю.Т. Чекемес // Вестник сельскохоз. науки Казахстана. – 1979. – № 11. – С. 90–94.
66. Лаврик, А.Н. Использование спиртов в качестве топлив для двигателей внутреннего сгорания / А.Н. Лаврик // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 53–54.
67. Лазарев, Е.А. Снижение содержания токсичных веществ в отработавших газах дизеля / Е.А. Лазарев, В.Е. Лазарев // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: Сб. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 54–58.
68. Лоскутов, А.С. Снижение выбросов окислов азота дизелями в атмосферу / А.С. Лоскутов, А.Л. Новоселов, В.А. Вагнер. – Барнаул: Алтайское краевое правление Союза НИО СССР, 1990. – 120 с.
69. Малов, Р.В. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды / Р.В. Малов, В.И. Ерохов, В.А. Щетинин. – М.: Транспорт, 1982. – 200 с.
70. Марков, В.А. Экологические показатели ДВС / В.А. Марков, С.А. Аникин, Е.А. Сиротин // Автомобильная промышленность. – 2002. – № 2. – С. 13–15.
71. Медведков, В.И. Автомобили КамАЗ-5320 и 4310, Урал-4320: уч-к / В.И. Медведков, С.Т. Билык, Г.А. Гришин. – М.: ДОСААФ, 1987. – 372 с.
72. Мелик-Ахназаров, Т.Х. ГОСТ и ТУ по бензинам / Т.Х. Мелик-Ахназаров // Автомобильная промышленность. – 2000. – № 6. – С. 24–26.
73. Мельберт, А.А. Конструкции нейтрализаторов отработавших газов дизелей. Совершенствование быстроходных дизелей / А.А. Мельберт // Межвуз. сб. науч. трудов. – Барнаул: Алт. ГТУ, 1991. – С. 129–132.
74. Мельберт, А.А. Оценка эффективности нейтрализации отработавших газов дизелей / А.А. Мельберт, А.С. Павлюк // Сб. научн. трудов. – Барнаул: Алт. ГТУ, 1997. – С. 5–8.
75. Моделирование образования вредных веществ в цилиндре дизеля. Математическое моделирование и исследование процессов в ДВС: учебн. пособ. / под ред. В.А. Вагнера, Н.А. Иващенко, В.Ю. Русакова. – Барнаул: Алт. ГТУ, 1997. – С. 84–99.

76. Морозова, В.С. Улучшение экологических характеристик дизеля конструктивными изменениями топливной системы / В.С. Морозова // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 58–60.
77. Новиков, Л.А. Создание установок очистки газов для стационарных дизелей и испытательных станций / Л.А. Новиков, Э.Н. Юрченко, В.А. Шляхтов // Двигателестроение, 1995. – С. 72–77.
78. Новиков Ю.В. Экология, окружающая среда и человек: учеб. пособ. для вузов, средних школ и колледжей / Ю.В. Новиков. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 2000. – 320 с.
79. Новиков, Ю.В. Окружающая среда и транспорт / Ю.В. Новиков, И.Р. Голубев. – М.: Транспорт, 1987. – 207 с.
80. Новоселов, А.Л. Основы инженерной экологии в двигателестроении / А.Л. Новоселов, А.А. Мельберт, С.Л. Беседин. – Барнаул: АГТУ, 1993. – 99 с.
81. Новоселов, А.Л. Снижение токсичности автотракторных дизелей: учеб. пособ. по целевой подготовке специалистов ДВС / А.Л. Новоселов [и др.]. – Барнаул: Алт. ГТУ, 1996. – 122 с.
82. Новоселов, А.Л. Выбор конструкции нейтрализатора для дизеля сельскохозяйственного назначения / А.Л. Новоселов, А.С. Павлюк, А.А. Мельберт // Сб. науч. трудов. – Барнаул: Алт. ГТУ, 1997. – С. 121–126.
83. Общие технические требования (ОТТ 11. 10. 99).
84. Павлова, Е.И. Экология транспорта: учебник для вузов / Е.И. Павлова. – М.: Транспорт, 2000. – 248 с.
85. Парниковый эффект и проблематика CO₂. Экологические проблемы на транспорте // Экспресс–информация, 1990, № 45. – Реферат 276. – С. 2–5.
86. Печуркин, Н.С. Энергия и жизнь. – Новосибирск: Наука, 1988. – 190 с.
87. Поликер, Б.Е. О повышении экономичности и снижении токсичности отработавших газов дизелей / Б.Е. Поликер, Л.Л. Михальский // Грузовик. – 1997. – № 10. – С. 29–31.
88. Поповиченко, Р.Н. Автомобильный транспорт и окружающая среда / Р.Н. Поповиченко. – Караганда: КПИ, 1986. – 85 с.
89. Реймерс Н.Ф. Экология: теория, законы, правила, принципы и гипотезы / Н.Ф. Реймерс. – М.: Россия молодая, 1994. – 367 с.
90. Семенов, Н.Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения: учеб. пособ. / Н.Н. Семенов. – М.: Знание, 1969. – 126 с.
91. Семина, Н.В. Экологически чистый автомобиль – мечта или реальность? / Н.В. Семина. – М.: Транспорт, – 1990. – 44 с.
92. Скалкин, Ф.В. Энергетика и окружающая среда / Ф.В. Скалкин, А.А. Канаев, И.З. Копп. – Л.: Энергоиздат, 1988. – 180 с.
93. Смайлис, В.И. Малотоксичные дизели. Особенности конструкции, рабочего процесса и испытаний / В.И. Смайлис. – Л.: Машиностроение, 1972. – 128 с.
94. Смаль, Ф.В. Перспективные топлива для автомобилей / Ф.В. Смаль, В.Е. Аксенов. – М.: Транспорт, 1979. – 151 с.
95. Абрамчук, Ф.И. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Ф.И. Абрамчук [и др.] под ред. А.Ф. Шехова. – К.: Техника, 1992 – 27 с.
96. Ставров, А.П. Снижение токсичности отработавших газов автомобилей, применением перспективных топлив / А.П. Ставров // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 71–73.
97. Толшин, В.И. Рециркуляция ОГ как средство снижения оксидов азота судового дизель-генератора / В.И. Толшин, В.В. Якунчиков, Т.В. Чуб // Двигателестроение. – 2000. – № 4. – С. 20–21.
98. Фадеева, М.В. Исследование состава атмосферного воздуха на основных магистралях г. Челябинска и в прилегающей жилой зоне / М.В. Фадеева и [др.] // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 82–83.

99. Фадеева, М.В. Исследование состава атмосферного воздуха в жилых микрорайонах г. Челябинска / М.В. Фадеева и [др.] // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: Сб. науч. статей науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 83–84.
100. Филипосянц, Т. Ограничение выброса вредных веществ с отработавшими газами дизелей / Т. Филипосянц // Автомобильная промышленность. – 1982. – № 11. – С. 33–34.
101. Хазен, М.М. Научно-методическое значение эксергии для термодинамического анализа тепловых процессов теплоэнергетических установок / Хазен М.М. // сб. науч.-метод. ст. по тепло-технике. – М.: Высш. шк., 1977. – Вып. 2. – С. 12–18.
102. Химический энциклопедический словарь / под ред. И.И. Клунынца. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 103 с.
103. Химия нефти и газа: учеб. пособ. / под ред. В.А. Проскуракова, А.Е. Драпкина. – Л.: Химия, 1989 – 301 с.
104. Хортов, В.П. Новый взгляд на экологическую опасность АТС / В.П. Хортов // Автомобильная промышленность. – 2000. – № 6. – С. 22–24.
105. Хортов, В.П. Новый взгляд на токсичность автомобильных двигателей в условиях городского движения / В.П. Хортов // Грузовик. – 2000. – № 5. – С. 8–11.
106. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела; пер. с польского Ю.И. Батурина и Д.Ф. Стржижовского. – М.: Энергия, 1968. – 279 с.
107. Шароглазов, Б.А. Улучшение экологических показателей дизеля за счет сообщения глушителям шума отработавших газов функций по сажеочистке / Б.А. Шароглазов, П.Р. Дулевский // Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.-практич. конф. – Челябинск, 2001. – С. 86–88.
108. Шахидулла, С.А. Оценка уменьшения расхода топлива в карбюраторном двигателе при использовании бензоэтиленной смеси и системы утилизации теплоты: дис. ... канд. тех. наук. / С.А. Шахидулла. – Харьков, 1985. – 209 с.
109. Шечков, Г.Т. Проблемы создания каталитических нейтрализаторов отработанных газов ДВС / Г.Т. Шечков, О.А. Лебедева, И.Н. Арискина // Совершенствование быстроходных дизелей: тезисы докладов междунауч.-практич. конф. – Барнаул: Алт. ГТУ, 1993. – С. 69–71.
110. Шилейко, А.В. В океане энергии / А.В. Шилейко, Т.И. Шилейко. – М.: Знание, 1989. – 192 с.
111. Шокотов, Н.К. О располагаемых резервах повышения КПД дизеля 6ЧН 26/34 и карбюраторного двигателя ЗиЛ-130 в случае применения на них систем утилизации / Н.К. Шокотов [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания: Республ. межведомств. тематич. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища шк., 1984. – Вып. 40. – С. 18–23.
112. Экономичность и токсичность дизельных двигателей грузовых автомобилей / M. Bidault // Pollut. Atmos. – 1980. – № 85. – 116–121.
113. Юрковский, И.М. Автомобиль КамАЗ. Устройство, техническое обслуживание, эксплуатация / И.М. Юрковский, В.А. Толпыгин. – М.: ДОСААФ, 1975. – 406 с.
114. Aly, S. Diesel engine waste heat power cycle / S. Aly // Heat Recov. Syst. and CHP, – 1987. – № 5. – V. 7. – P. 445–451.
115. Baehr, H. BWK / H. Baehr, E. Schmidt // BWK. – 1964. – 16. – № 2. – P. 63–66.
116. Bertoli, C. Impiego Di Filtri Di Particolato Allo Scarico Di Un Motore Diesel Iniezione Diretta / C. Bertoli e. al. // II Coveqno Internazionale Metodologie e Mezzi Innovativi Per La Sperimentazione Nel Settore Automobilistico, Firenze, 22–25 November 1988. P. 357–375.
117. Daudas Ir. Moteurs composites alternatifs a combustion / Ir. Daudas // Rev. M., –1986. – № 3–4. – 29. – P. 219–227.
118. Direct digital control of electronic unit injectors // Society of Automotive Engineers, Technical Paper Series, 1984, № 840274. – 10 p.
119. Diesel emission control for the 1990. // Automate Eng. – 1988. – 96 p.

120. Commer, I. Engines and Emission // I. Commer, J. Carrier. 1989. – 146, № 3. – P. 139–144.
121. Cucchi, C. Evolution of emissions legislation of Europe and impact on technology / C. Cucchi, M. Hublin // SAE Techn. Pap. Ser. – 1989. – P. 96–101.
122. For the proposed identification of diesel exhaust as toxic air contaminant / Part B: Health risk assessment for diesel exhaust // California EPA, Office of Environmental Health Hazard Assessment, Air Toxicology and Epidemiology Section. – May 1998. – 453 p.
123. Jeaple, F. Engines and cycles aim for efficiency / F. Jeaple // Product Engineering, 1977. – № 1. – P. 35–38.
124. Kittelson, D.B. Review of diesel particulate matter sampling methods / D.B. Kittelson // Final report University of Minnesota. 1999. – 6 p.
125. Kittelson, D.B. Formation of nanoparticles during exhaust dilution / D.B. Kittelson, I. Abdul-Khalek // EFI Members conference “Fuels, Lubricants, Engines & Emissions” – 1999. – January 18–20. – 13 p.
126. Lies, K.H. Characterization of exhaust emissions from diesel-powered passenger cars with particular reference to unregulated components / K.H. Lies e. al. // SAE Tech. Pap. Ser. – 1984. – N 840361. – 27 p.
127. Lipkea, W.H. The physical and chemical character of diesel particulate emissions – measurement techniques and fundamental considerations / W.H. Lipkea, J.H. Johnson, C.T. Vuk // SAE Tech. Pap. Ser. 1978. – N 780108. – 57 p.
128. Nauss, K. Diesel exhaust: a critical analysis of emission exposure and health effects / K. Nauss // Summary of HEI special report. 1997. – 6 p.
129. Publow, G. Performance of late model cars with gasoline – methanol fuel / G. Publow e. al. // SAE Techn. Pap. Ser. 1978. – № 780948, – 8 p.
130. Rant, Z. Energies and Exercise / Z. Rant // Dusseldorf, 1965. – P. 33–39.
131. Part, A. Report to Air resources Board on the proposed identification of diesel exhaust as toxic air contaminant / A. Part // Exposure assessment. 1978. – 103 p.
132. Robertson, C.S. A multi-vane expander, by adding power, can improve the fuel economy of long haul diesel trucks / C.S. Robertson, S.E. Eckord // SAE Tech. Paper Series, 1978. – № 780. – P. 1–19.
133. Schuetzle, D. The identification and potential sources of nitrated polynuclear aromatic hydrocarbons (nitro-PAN) in diesel particulate extracts / D. Schuetzle et al. // Mobil source emissions including polycyclic organic species / Proc. NATO Adv. Inst. Liege – 1982. – Aug.30-Sept.2. – Н. 299–312.
134. Карпенко, А.Г. Материаловедение. Расходные материалы автотранспортной техники: учеб. пособие / А.Г. Карпенко, В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2013. – 227 с.
135. Карпенко, А.Г. Автомобильные эксплуатационные материалы: сб-к лаб. работ / А.Г. Карпенко, К.В. Глемба, В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2014. – 124 с.
136. Smyrnov, Y.N. Physical and Computer modeling of nev soft reduction Process of continuously cast blooms / Y.N. Smyrnov, V.A. Belevitin, V.A. e. al // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2015. – 50. – № 6. – P. 12–17.
137. Belevitin, V.A. Simulation of the macrostructure influence of forging ingots on the potential capabilities of obtaining high-quality forgings / V.A. Belevitin, Y.N. Smyrnov, S.Y. Kovalenko, A.V. Suvorov // Metallurgical and Mining Industry, Ukrmetallurginform “Scientific and Technical Agency”. Ltd., –2016. – № 7. – P. 18–23.
138. Smyrnov, Y.N. Defect Healing in the Axial Zone of Continuous-Cast Billet / Y.N. Smyrnov, V.A. Skliar, V.A. Belevitin e. al // Steel in Transiation, Allerton Press. 2016. – Vol. 46, – Nr. 5. – P. 325–328.
139. Белевитин, В.А. Операционно-зачетные работы по общеслесарной производственной практике: сб-к лаб. работ / В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Е.П. Меркулов. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2015. – 184 с. Smyrnov

140. Минаев, А.А. Расчет параметров пластического формоизменения сортовых заготовок / А.А. Минаев, В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 1990. – № 12. – С. 26–28.
141. Бражников, А.И. Ультразвуковой спектральный метод технологического контроля концентрации электролита Н.И. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин и [др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 3. – С. 54–56.
142. Голубчик, Р.М. О выборе оптимального соотношения диаметров валков и заготовки для винтовой прокатки / Р.М. Голубчик, В.К. Воронцов, В.А. Белевитин // Сталь. – 1982. – № 8. – С. 64–66.
143. Воронцов, В.К. Исследование полей перемещений при прокатке квадратной полосы в овальном калибре / В.К. Воронцов, Ю.С. Атеф, В.В. Бринза, В.А. Белевитин // Известия вузов Черная металлургия, 1977. – № 5. – С. 101–105.
144. Belevitin, V.A. The Study of Three-Dimensional Flow of Metal under Free Forming / V.A. Belevitin, V.F. Obesnyuk, E.R. Logunova // Металлы. 2003. – № 1. – С. 26–32.
145. Белевитин, В.А. Материаловедение. Свойства металлов и сплавов: учеб. пособие / В.А. Белевитин // Челябинский государственный педагогический университет. – Челябинск, 2012.
146. Воронцов, В.К. К постановке и решению объемной задачи пластического течения методами экспериментальной механики / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 1976. – № 4. – С. 75–80.
147. Воронцов, В.К. К решению объемной задачи стационарного пластического течения металла методом координатной сетки / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 1976. – № 9. – С. 77–80.
148. Бражников, Н.И. Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин и [др.] // М.: Теплотехника. – 2008. – 256 с.
149. Белевитин, В.А. Ультразвуковой контроль качества кованных валов / В.А. Белевитин, Н.И. Бражников // Сталь. – 2000. – № 4. – С. 47–48.
150. Бражников, А.И. Бесконтактный одноканальный времяимпульсный расходомер жидкости / А.И. Бражников, В.А. Белевитин и [др.] // Метрология. – 2004. – № 11. – С. 16.
151. Минаев, А.А. О моделировании пластического формоизменения раскатов с неравномерным распределением температуры по поперечному сечению пластилиновых моделей / А.А. Минаев, Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин // Известия вузов Черная Металлургия, 1992. – № 4. – С. 57–59.
152. Brazhnikov, A.I. Ultrasonic Control of the Fluid-Flow Velocity Without / A.I. Brazhnikov, V.A. Belevitin, F.I. Brazhnikov, E.L. Ivanov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. – V. 79. – No 2. – P. 345–353.
153. Белевитин, В.А. Основания необходимости учета несовершенств кузнечного слитка при проектировании процессаковки на прессах / В.А. Белевитин, А.А. Сеницын, А.В. Суворов, С.Ю. Коваленко // Безопасность социальной сферы в условиях современной поликультурной России: материалы Всеросс. науч.-практич. конф.-ии. – 2012. – С. 280–287.
154. Белевитин, В.А. Моделирование пластического формоизменения металлических заготовок / В.А. Белевитин, А.В. Суворов, С.Ю. Коваленко, Е.Н. Смирнов // Итоги науки: Избранные труды Междун. симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – 2014. – С. 175–199.
155. Коваленко, С.Ю. Инновационные технологии программного обеспечения при компьютерном моделировании процессов обработки металлов давлением / С.Ю. Коваленко, А.В. Суворов, В.А. Белевитин // Проблемы подготовки бакалавров профессионального обучения: сборник науч. трудов под ред. Е.А. Гнатышиной, Н.В. Увариной, В.А. Белевитина. – Челябинск. – 2014. – С. 197–202.

156. Белевитин, В.А. Инновационные подходы в моделировании неоднородностей материала кузнечных слитков / В.А. Белевитин, С.Ю. Коваленко // Наука и технологии: Избранные труды Всеросс. Конф-ции по проблемам науки и технологий. – 2014. – С. 144–166.
157. Лапаева, О.Ф. Роль энергосбережения в повышении энергетической эффективности региона / О.Ф. Лапаева, С.А. Дедеева / Вестник ОГУ. – 2014. – № 14 (175). – С. 116–120.
158. Ульянова, В.Г. Формирование гуманистических ценностей будущих офицеров в образовательном процессе военного вуза: автореф. ... дис. канд. пед. наук / В.Г. Ульянова. – Челябинск, 2007.
159. Ульянова, В.Г. Психолого-педагогические проблемы деонтологической подготовки студентов по иностранному языку / В.Г. Ульянова и [др.] // Английский для нефилологов. Проблемы ESP-2012.: сб. – Воронеж, 2012. – С. 35–37.
160. Ульянова, В.Г. Системы и механизмы двигателя внутреннего сгорания: уч. пособие на английском языке / В.Г. Ульянова. – Челябинск, 2015.
161. Хасанова, М.Л. Опыт применения ментальных карт при изучении технических дисциплин / М.Л. Хасанова // Подготовка профессиональных управленческих кадров: опыт, проблемы, инновационные образовательные технологии: сб. – 2015. – С. 163–167.
162. Руднев В.В. Непосредственный наддув как способ повышения приемистости ДВС / В.В. Руднев, В.С. Кукис, М.Л. Хасанова, О.И. Быстров // Научный вестник. – 2009. – № 20. – С. 122.
163. Технология производства изделий из композиционных полимерных материалов [Электронный ресурс]. – Режим допуска: http://www.elar.urfu.ru/bitstream/10995/3568/12/1358540_lectures_ch_2.pdf.

Научное издание

**Руднев Валерий Валентинович
Хасанова Марина Леонидовна
Белевитин Владимир Анатольевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
КРУПНЫХ ГОРОДОВ**

Монография

ISBN 978-5-906908-38-4

Работа рекомендована РИСом университета.
Протокол № 2/16 (пункт 12) от 14.12.2016 г.
Издательство ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор О.В. Угрюмова
Компьютерный набор В.А. Белевитин

Подписано в печать 08.02.2017

Бумага типографская
Формат 60x84/8
Заказ №

Объем 5,5 п. л.
Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69