

## ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Филин А.Ю. - студент, Меняев К.В. - доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Гидроэлектростанция (ГЭС) — электростанция, использующая в качестве источника энергии энергию водных масс в русловых водотоках и приливных движениях [1].

Гидроэлектростанции обычно строят на реках, сооружая плотины и водохранилища. Для эффективного производства электроэнергии на ГЭС необходимы два основных фактора: гарантированная обеспеченность водой круглый год и возможно большие уклоны реки, благоприятствуют гидростроительству каньонобразные виды рельефа [1].

Принцип работы ГЭС достаточно прост. Цель гидротехнических сооружений обеспечивать необходимый напор воды, поступающей на лопасти гидротурбины, которая приводит в действие генераторы, вырабатывающие электроэнергию [1].

Необходимый напор воды образуется посредством строительства плотины, и как следствие концентрации реки в определенном месте, или деривацией — естественным потоком воды. В некоторых случаях для получения необходимого напора воды используют совместно и плотину, и деривацию [1].

Непосредственно в самом здании гидроэлектростанции располагается все энергетическое оборудование. В зависимости от назначения, оно имеет свое определенное деление. В машинном зале расположены гидроагрегаты, непосредственно преобразующие энергию тока воды в электрическую энергию. Есть еще всевозможное дополнительное оборудование, устройства управления и контроля над работой ГЭС, трансформаторная станция, распределительные устройства и многое другое [1].

Особенности ГЭС:

- Себестоимость электроэнергии на российских ГЭС более чем в два раза ниже, чем на тепловых электростанциях.

- Турбины ГЭС допускают работу во всех режимах от нулевой до максимальной мощности и позволяют плавно изменять мощность при необходимости, выступая в качестве регулятора выработки электроэнергии.

- Сток реки является возобновляемым источником энергии.

- Строительство ГЭС обычно более капиталоемкое, чем тепловых станций.

- Часто эффективные ГЭС более удалены от потребителей, чем тепловые станции.

- Водоохранилища часто занимают значительные территории, но примерно с 1963 г. начали использоваться защитные сооружения (Киевская ГЭС), которые ограничивали площадь водохранилища, и, как следствие, ограничивали площадь затопляемой поверхности (поля, луга, поселки).

- Плотины зачастую изменяют характер рыбного хозяйства, поскольку перекрывают путь к нерестилищам проходным рыбам, однако часто благоприятствуют увеличению запасов рыбы в самом водохранилище и осуществлению рыбоводства.

- Водоохранилища ГЭС, с одной стороны, улучшают судоходство, но с другой — требуют применения шлюзов для перевода судов с одного бьефа на другой.

- Водоохранилища делают климат более умеренным.

Преимущества:

- использование возобновляемой энергии;

- очень дешевая электроэнергия;

- работа не сопровождается вредными выбросами в атмосферу;

- быстрый (относительно ТЭЦ/ГЭС) выход на режим выдачи рабочей мощности после включения станции.

Недостатки:

- затопление пахотных земель;

- строительство ведется только там, где есть большие запасы энергии воды;

-горные реки опасны из-за высокой сейсмичности районов;

-экологические проблемы: сокращенные и нерегулируемые попуски воды из водохранилищ по 10-15 дней (вплоть до их отсутствия), приводят к перестройке уникальных пойменных экосистем по всему руслу рек, как следствие, загрязнение рек, сокращение трофических цепей, снижение численности рыб, элиминация беспозвоночных водных животных, повышение агрессивности компонентов гнуса (мошки) из-за недоедания на личиночных стадиях, исчезновение мест гнездования многих видов перелетных птиц, недостаточное увлажнение пойменной почвы, негативные растительные сукцессии (обеднение фитомассы), сокращение потока биогенных веществ в океаны [1].

В России, технически возможный гидроэнергетический потенциал наших рек составляет по расчетам экспертов 1670 млрд. кВт/ч. Этот показатель почти в полтора раза превышает объем энергопотребления страны. При этом степень его использования действующими ГЭС составляет всего 10,5%. При этом гидропотенциал размещен неравномерно: большая его часть сосредоточена в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. В Европейской части страны значительные неиспользованные гидроэнергетические ресурсы находятся на Северном Кавказе, а также на Европейском Севере и Северо-Западе.

Согласно программе развития единой энергосистемы России на 2012-2018 годы, вводы мощности на ГЭС России в этот период предусматриваются в объеме 3830,2 МВт. Будет ли начато строительство других новых ГЭС – большой вопрос.



Рисунок 1 - Красноярская ГЭС

#### Список литературы:

1. Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. - <http://wikipedia.org> . – (дата обращения: 14.12.2015).

## СЖИГАНИЕ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Гришина Р.А. - студент, Меняев К.В. - доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Одним из источников энергии является биомасса. Термин биомасса объединяет все органические вещества растительного и животного происхождения. Биомасса делится на первичную (растения, животные, микроорганизмы) и вторичную (отходы при переработки первичной биомассы и продукты жизнедеятельности человека и животных), в свою очередь отходы делятся на первичные – отходы при переработке первичной биомассы (солома, ботва, опилки и т.д.) и вторичные – продукты физиологического обмена животных и человека.

Ежегодное количество органических отходов по разным отраслям народного хозяйства России составляет более 390 млн. тонн. Сельскохозяйственное производство дает 250 млн. тонн, из них 150 млн. тонн приходится на животноводство и птицеводство, 100 млн. тонн на растениеводство. Лесо- и деревообработка дают 70 млн. тонн, твердые бытовые отходы городов – 60 млн. тонн. Осадки коммунальных стоков – 10 млн. тонн (все приведенные выше значения приведены на абсолютно сухое вещество) [1].

Энергия, запасенная в первичной и вторичной биомассе, может конвертироваться в технически удобные виды топлива или энергии несколькими путями: получение растительных углеводов, (например рапсовое масло, добавляемое к дизельному топливу); термохимическая конверсия биомассы в топливо: прямое сжигание, пиролиз, газификация, сжигание, флест-пиролиз; биотехническая конверсия биомасс в топливо: низкоатомные спирты, жирные кислоты, биогаз.

На современном этапе экономического развития России нетрадиционная энергетика развивается по двум последним направлениям.

Анализ показывает, что при пересчете на горючую массу состав растительных отходов практически идентичен составу твердого топлива по основным элементам и изменяется в пределах:  $C^r = 48...53$ ;  $H^r = 5...7$ ;  $O^r = 35...42$ ;  $N^r = 0,2...0,10$ ;  $S^r = 0...0,2\%$ , зольность от 1% (лузга подсолнечника) до 4...5 % (солома), а на рисовой лузге зольность может достигать 10...20 %. Низшая теплота сгорания растительных отходов поступающих на сжигание, в зависимости от вида топлива, года уборки, региона колеблется от 5 до 15 МДж/кг. Температура размягчения золы растительных отходов по исследованиям изменяется в пределах 1150...1250 К [2].

Растительные отходы существенно различаются по физико-механическим свойствам, что необходимо учитывать при проектировании топочного устройства. Сжигать на колосниковых решетках топок в плотном слое мелочь такую, например, как лузга подсолнечника, рисовая шелуха и отчасти солома, достаточно сложно. При этом неизбежны большие потери тепла с невыгоревшим топливом, провалом и уносом.

Растительные отходы, по сравнению с другими видами твердых топлив, характеризуются повышенным содержанием кислорода, малой зольностью и повышенным выходом летучих. Так же лузга обладает повышенной парусностью и легко выносятся из традиционных топочных устройств. Кроме того подсолнечная лузга содержит в своем составе щелочные металлы, которые при температуре выше 1100 – 1200 °С возгоняются из золы и образуют прочные отложения на стенках топки и трубах конвективного пучка.

Методы огневой утилизации растительных отходов. Слоевой способ сжигания. Сжигание подсолнечной лузги можно реализовать в топках, основанных на слоевом способе сжигания. Конструкции этих топочных устройств наиболее просты, надежны в эксплуатации и могут быть приспособлены к часто изменяющемуся фракционному составу и влажности лузги [3].

Слоевой способ сжигания подсолнечной лузги может быть реализован путем использования следующих принципов организации работы слоя (рисунки 1 – 5).

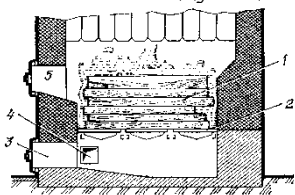


Рисунок 1 - Сжигание подсолнечной лузги в горизонтальном слое

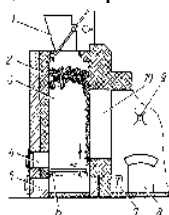


Рисунок 2 - Сжигание топлива в вертикальном слое

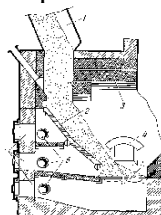


Рисунок 3 - Сжигание топлива в наклонном слое

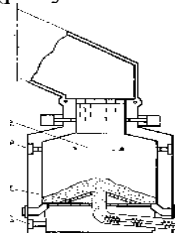


Рисунок 4 - Кучевое сжигание подсолнечной лузги

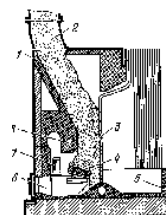


Рисунок 5 - Сжигание топлива в зажатом слое.

Вихревой способ сжигания. Вихревой способ сжигания заключается в сжигании измельченных высокорекреационных топлив во взвешенном состоянии во время витания их частиц в топочной камере по круговым или петлевым траекториям (рисунок 6). Вращательное движение газовой среды в топочной камере создается нижним подводом первичного воздуха тангенциально закругленной внутренней поверхностью этой камеры[3].

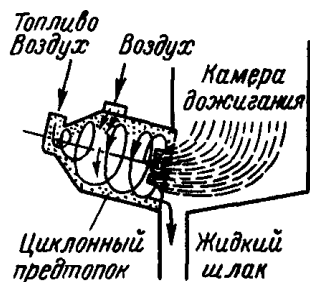


Рисунок 6 - Вихревой способ сжигания лузги подсолнечника

Циклонный способ сжигания. Циклонный процесс сжигания по своему принципу аналогичен вихревому процессу (рисунок 7). Сущность циклонного процесса заключается в том, что сжигание мелкого топлива локализуется в цилиндрической топочной камере, где посредством подвода воздуха тангенциально внутренней поверхности камеры создается интенсивное вращательное движение воздуха, продуктов горения и взвешенных в этой газовой среде частичек топлива[3].



Рисунок 7 - Циклонный способ сжигания

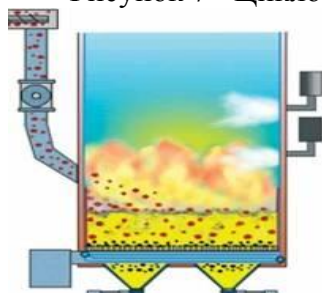


Рисунок 8 - Сжигание лузги в топке НТКС

Сжигание в топках низкотемпературного кипящего слоя. Для сжигания подсолнечной лузги применяются топки низкотемпературного кипящего слоя (НТКС) (рисунок 8), в том числе для сжигания отходов влажностью 60 и более процентов. Котлы с топками НТКС успешно работают на сельскохозяйственных предприятиях. Технология "кипящего слоя" позволяет повышать эффективность сжигания низкокачественных

или нетрадиционных видов топлива. Второе преимущество - экологичность, в частности, количество выбросов токсичных оксидов серы в атмосферу может быть снижена больше чем на 90%. Третье преимущество - высокая эффективность сжигания и теплообмена[3].

Одной из конструкций котлов для сжигания высокопарусных топлив, в частности лузги, является паровой котел марки КЕ- 6,0 Бийского котельного завода (рисунок 9). У этого котла имеется предтопок, в который через тангенциально расположенные горелки подается лузга и необходимый для горения воздух. В предтопке организуется вихрь, который обеспечивает необходимую сепарацию коксовых частиц препятствуя их выносу в газоходы. Для поддержания процесса горения в камере дожигания установлены газовые горелки.

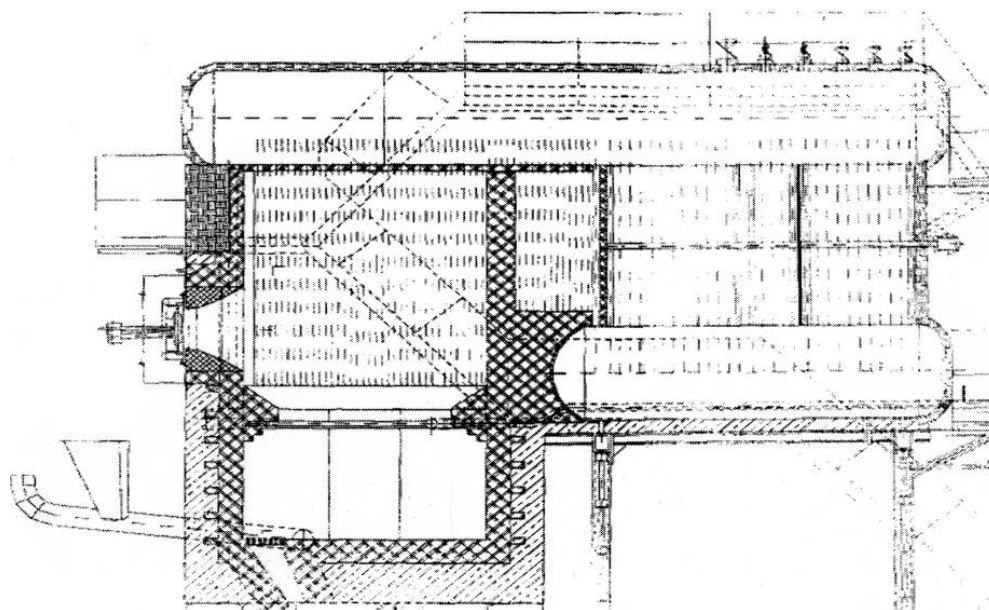


Рисунок 9 - Котел КЕ-6,0

Для сжигания измельченных растительных отходов, и особенно лузги подсолнечника, требуется специальное топочное устройство. В паровом котле использована низкотемпературная сдвоенная вихревая топка, ее аэродинамическая схема разработана на основе принципов сжигания твердого топлива в циклонных топках. За счет эффективного удержания легких частиц топлива в топке происходит глубокое выжигание горючих веществ с одновременным устранением образования внутритопочных и натрубных отложений, характерных для высокотемпературных топочных процессов.

Эффективность удержания частиц в топке возрастает с увеличением их массы. Соответственно при этом создаются условия для глубокого выгорания и таких массивных частиц, как вылетевшие в топку с лузгой зерна и устраняется опасность пожаров в дымоходах и золоуловителях котельной установки.

Низкотемпературный режим обеспечивается расположением в топке большой поверхности нагрева - боковых и дополнительных экранов парового котла и созданием активной аэродинамики в топочном объеме.

#### Список литературы:

1. Использование биомассы при производстве электрической энергии. Вихарев Ю.В. Экономия энергии ВИНТИ. 2002 №5 стр. 63-64.
2. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства. - М.: Энергия, 1976.
3. Вихревые топки для сжигания лузги.- URL <http://www.ekovortex.ru>.

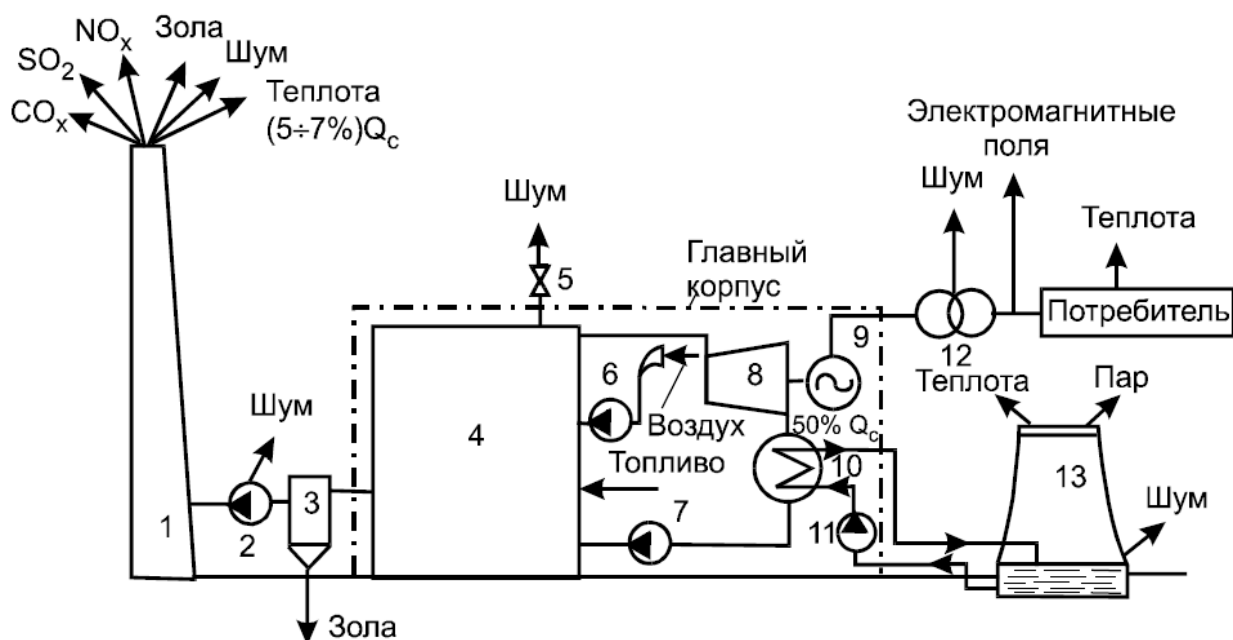
## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ НА ТЭС

Сарсембенев Е.К. - студент, Тиханов М.В. - студент, Бородин Р.Г. - студент, Шпехт А.В. - студент, Мальчугов А.С. - студент, Устинов В.А. - студент, Меняев К.В. - доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Сжигание топлива на тепловых электрических станциях и в котельных приводит к выбросу в атмосферу продуктов сгорания органических топлив, содержащих окислы серы и азота, частицы недогоревшего твердого топлива, а при сжигании мазута частицы сажи. Эти выбросы оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, вредные выбросы, золоулавливание.

Тепловые электрические станции (ТЭС) являются существенным источником загрязнения атмосферы (рисунок 1). Поэтому проблемы снижения вредных выбросов ТЭС в атмосферу, контроль и управление его качеством, являются в настоящее время одними из первоочередных задач, которые требуют своего решения.



1 - дымовая труба, 2 - дымосос, 3 - золоуловитель, 4 - паровой котел, 5 - предохранительный клапан, 6 - вентилятор, 7 - питательный насос, 8 - паровая турбина, 9 - генератор, 10 - конденсатор, 11 - циркуляционный насос, 12 - повышающий трансформатор, 13 - градирня.

Рисунок 1 - Источники загрязнений на ТЭС

Эффективность работы газоочистных устройств (золоуловителей) в большей степени зависит от физико-химических свойств улавливаемой золы и поступающих в золоуловитель дымовых газов. Основными характеристиками золы являются плотность, дисперсный состав, электрическое сопротивление (для электрофильтров), слипаемость.

Основными мероприятиями для снижения выбросов окислов азота и серы в атмосферу являются:

- рассеивание вредных выбросов с помощью высотных дымовых труб на большой площади;

- непосредственное воздействие на механизм образования вредных примесей при горении топлива (сжигание топлив с малыми избытками воздуха, рециркуляция продуктов сгорания, двухступенчатое сжигание топлива и т.д.);

- очистка продуктов сгорания от вредных примесей (очистка дымовых газов от окислов серы и азота);

- удаление вредных компонентов из топлива до его сжигания (очистка топлив от соединений серы и газификация топлив);

- применение технологии кипящего слоя [1].

По данным моделирования в город с населением 1 млн. человек ежедневно поступает 730000 тонн различных веществ. Из них 1000 тонн – газообразные и пылевые загрязняющие вещества. Причем максимум поступления в атмосферу загрязняющих веществ отмечается в зимние месяцы, когда на полную мощность работают ТЭЦ и котельные. В связи с вышесказанным представляет определенный интерес рассмотрение различных методов золоулавливания.

Основные виды золоуловителей на ТЭС[2]:

- гравитационные пылеуловители;

- инерционные пылеуловители;

- мокрые пылеуловители;

- фильтры;

- электрофильтры.

Основные проблемы золоулавливания на ТЭС[2]:

- устаревшее оборудование золоулавливания на ТЭС;

- эксплуатационные проблемы, связанные с нарушением правил эксплуатации золоуловителей.

Основные перспективы развития золоулавливания на ТЭС:

- использование инновационных методов, вместо устаревшего оборудования;

- использование золоуловителей-эмульгаторов.

В эмульгаторах используются следующие механизмы осаждения пыли, в той или иной степени связанные с размером газовых пузырьков в потоке двухфазной среды [2]:

- гравитационное осаждение - этот механизм характерен для крупных частиц и малых скоростей газов;

инерционное осаждение - происходит тогда, когда масса частицы или скорость ее движения настолько значительны, что она не может следовать по линии тока газа, а продолжает движение по инерции, сталкивается с препятствием и прилипает к нему. В данном случае препятствие - это граница пузырьков газа. Эффект усиливается с турбулизацией потока;

- осаждение под действием центробежной силы - процесс происходит аналогично инерционному осаждению, только в данном случае траектория движения пузырьков не случайна, а специально созданная конструкцией аппарата;

- диффузионное осаждение, когда мелкие частицы испытывают непрерывное воздействие молекул газа, находящихся в броуновском движении, в результате которого возможно осаждение этих частиц на поверхности пузырьков газа. С повышением температуры и с уменьшением диаметра газовых пузырьков диффузионный эффект осаждения возрастает;

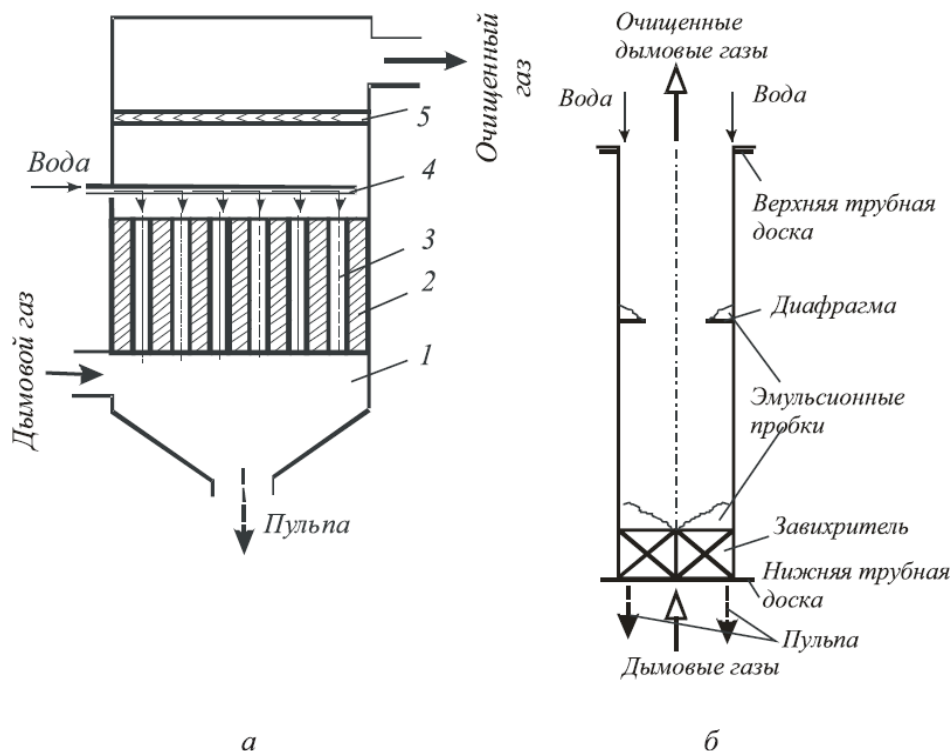
- электростатическое осаждение возможно в результате появления электростатических зарядов на пылевых частицах и каплях жидкости.

В настоящее время на ТЭС применяются эмульгаторы двух типов: батарейные эмульгаторы (УЭЗ) и эмульгаторы кольцевые однотрубные (ЭКО).

В батарейных эмульгаторах запыленный газовый поток подается снизу в трубчатые фильтрующие элементы и закручивается завихрителями (рисунок 2), при этом центробежными силами зола отбрасывается к периферии.

Основные плюсы золоуловителей-эмульгаторов:

- увеличение степени золоочистки при оптимальной нагрузке котла до  $99,5 \pm 0,2 \%$ ;
- надежность, обусловленная конструкцией установки и применением титана для заверителя (эмульгатора) и каплеуловителя;
- относительная простота монтажа (монтаж блоками в существующие корпуса);
- простота в эксплуатации (установка не требует постоянного контроля и специальных операций);
- отсутствие специальных сопел и форсунок, требующих настройки и регулирования;
- низкие требования к содержанию твердых примесей в орошающей воде.



а - контактный элемент эмульгатора, б - трубчатый фильтрующий элемент; 1 - корпус, 2 - кассета, 3 - трубка, 4 - коллектор воды, 5 – каплеуловитель.

Рисунок 2 - Батарейный эмульгатор УЭЗ-1

#### Список литературы:

1. Меняев К.В., Паутова Е.Е. Псевдооживление как решение экологических проблем в энергетике / Проблемы техносферной безопасности – 2015 : сборник статей I Международной заочной научно-практической конференции (10 февраля 2015 г.) / под ред. А. А. Мельберт, М. Н. Вишняк ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015.-206 с.
2. Беспалов В.И. Природоохранные технологии на ТЭС: учебное пособие / В.И. Беспалов, С.У. Беспалова, М.А. Вагнер; Томский политехнический университет. - 2-е изд. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.-240 с.



## ВЕТРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА: СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Дражникова Ю.П. – студент, Меняев К.В. – доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

С появлением на свете человека, появился и его интерес ко всему, что его окружает. В попытке описать и систематизировать знания, полученные из первых наблюдений и выводов, люди ввели разделение первооснов бытия на пять стихий. В различных учениях набор этих пяти столпов различается. Это могут быть земля, вода, огонь, воздух, эфир или земля, вода, воздух, дерево, металл и т.д. Неизменными всегда остаются только три элемента: земля, вода и воздух.

Развитие ветроэнергетики идет очень активно: к 2008 году общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 120 гигаватт! Поскольку мощность ветрогенератора зависит от площади лопасти генератора, имеется тенденция к увеличению их размеров, и эти сооружения мельницами никак не назовешь – теперь это турбины[1].

Важным является экологический аспект ветроэнергетики. По данным GlobalWindEnergyCouncil к 2050 году эта отрасль поможет уменьшить ежегодные выбросы CO<sub>2</sub> на 1,5 миллиарда тонн. К тому же турбины занимают совсем небольшую площадь ветряной фермы (порядка одного процента), а значит, остальная площадь открыта для сельского хозяйства. Это имеет большое значение в небольших густонаселенных странах.

Рассматриваемые сценарии в области энергопотребления сопоставляются с двумя вариантами развития ситуации в энергопотреблении. Важно отметить, что сценарии не предполагают, что растущий спрос неизбежно влечет увеличение поставок электроэнергии. С учетом того, что спрос должен быть снижен в результате осуществления мер по устранению угрозы изменения климата, энергоэффективность рассматривается как важный элемент в предлагаемых сценариях.

Наиболее консервативный вариант развития ситуации в электропотреблении - Консервативный прогноз- основан на данных доклада Международного энергетического агентства «Перспективы мировой энергетики» (WorldEnergyOutlook, 2005), экстраполированных на период до 2050 года. В этом докладе не принимаются в расчет никакие новые политические инициативы, и допускается, например, сохранение статус-кво по отношению к атомной энергетике. По прогнозам МЭА, «в отсутствии новых правительственных стратегий, мировой спрос на энергоресурсы будет неуклонно расти». Как следствие мировое потребление электроэнергии практически удвоится к 2030 году, достигнув 25 667 ТВт·час по сравнению с 13 423 ТВт·час в 2003 году. К 2050 году ежегодное электропотребление достигнет 37 935 ТВт·час.

Прогнозам Международного энергетического агентства противопоставлены результаты исследования в области энергосбережения Аэрокосмического центра Германии и Экофисконсалтанси (Ecofysconsultancy). В исследовании предложены оптимистичные сценарии развития с учетом осуществления мероприятий в области энергосбережения. В основе предлагаемых сценариев – применение в будущем самой передовой практики и технологий, существующих на сегодня, а также допущение, что развитие в области инновационных технологий не остановится на достигнутом.

Энергоэффективный прогноз, основанный на моделях, предложенных Аэрокосмическим центром Германии и Экофисконсалтанси, показывает эффект, который дает энергосбережение при решении глобальной проблемы растущего спроса на электроэнергию. Несмотря на то, что в настоящее время представлено большое количество технологий и инициатив в области энергосбережения, их распространение ограничено различными препятствиями в виде стоимостных ограничений и так далее. Но, несмотря на эти ограничения, рассматриваемый прогноз предполагает рост электропотребления менее чем на 30% к 2030 году (17,786 ТВт·час). В соответствии с Энергоэффективным прогнозом, рост

электропотребления к 2030 году предполагается на 39% ниже, чем в Консервативном прогнозе.

Исходном сценарии Европа будет доминировать на рынке ветроэнергетики. К 2030 году в Европе по-прежнему будет сосредоточен 51% мирового рынка ветровой энергетики. Следом за Европой 26% рынка придется на Северную Америку. Следующим по величине рынком станет Китай с 7%.

Согласно Оптимистичному сценарию, ожидается более чем значительный вклад со стороны Азии и Южной Америки с долей Китая, достигающей 16% к 2030 году, Южной Америки - 9% и Тихоокеанского региона – 7%. Доля Европы составит всего 19% от общей установленной мощности ветровой энергетики в мире. С учетом медленных темпов развития и сохраняющихся рыночных барьеров вклад стран с переходной экономикой будет менее значительным, чем ожидалось ранее[2].

Во всех трех сценариях предполагается, что увеличение доли новых мощностей ветроэнергетики идет с учетом замены выбывающих мощностей. Это связано с тем, что срок эксплуатации ветровых турбин составляет в среднем 20 лет. Турбины, замещаемые в сценарный период, имеют ту же установленную мощность, что и вновь вводимые установки. В результате, в доле вновь вводимых мощностей будет расти доля мощностей, идущих на замену выбывающих ветроустановок. Эти мощности, оказывая влияние на объемы инвестиций, уровень производства и занятость, не дают при этом увеличение общей установленной мощности.



Рисунок 1 - Ветровая электрическая станция

#### Список литературы:

1. Лейзерович А. (Калифорния). Куда дует ветер?// "Вестник", 2001, 3 июля.
2. GWEC, GreenpeaceInternational, DLR иEcofysCpnsultancy /Перевод и редакция русской версии доклада: С. Алексеева, А. Брандт, Е. Грачева, Е. Кирюшкина, В. Писарева, В. Чупров,И. Шарапов, Г. Шумкин.

## СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИКИ РФ

Князев И. И. - студент, Меняев К.В. – доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Энергетика РФ-отрасль российской экономики. Она касается всех энергетических составляющих в России. Существуют традиционные и нетрадиционные энергетические ресурсы, возобновляемые и невозобновляемые. Каждой из всех направлений управляет определенная компания, например: в электроэнергетике существуют масса компаний, управляющих электроэнергией по всей стране, такие компании как: «ЕЭС России», но в прошлом, управляла всей энергией, но в 2003 году произошло реформирование компании, позже произошла регистрация еще многих компаний, таких как: семь оптовых генерирующих компаний (ОГК), 14 территориальных генерирующих компаний (ТГК). Так же действуют еще несколько независимых или изолированных компаний, таких как: «Янтарьэнерго», «Якутскэнерго», «Дальневосточная энергетическая компания», «Татэнерго», «Башкирэнерго», «Иркутскэнерго» и «Новосибирскэнерго». В 2008 году владельцем акций межрегиональных сетевых компаний по распределению энергетических ресурсов стал «Холдинг МРСК[1].

В ядерной энергетике большую роль играют компании по добыче урановых руд, такая компания как: Приаргунское производственное горно-химическое объединение, добывает 93 % российского урана, обеспечивая 1/3 потребности в сырье. В 2007 году федеральные власти инициировали создание единого государственного холдинга «Атомэнергопром» объединяющего компании Росэнергоатом, ТВЭЛ, Техснабэкспорт и Атомстройэкспорт. Однако выработкой энергии занимаются станции, их не так много как тепловых, но на их долю приходится огромная часть для снабжения энергией, например - одна из крупнейших российских атомных электростанций — Балаковская АЭС — работает в базовой части графика нагрузки Объединенной энергосистемы Средней Волги[1].

Гидроэнергетика России обладает огромным потенциалом из-за большого количества рек на площади страны, но в основном более-менее развита она в Сибири и на Дальнем Востоке – в значительном отдалении от основного потребителя[1].

Крупнейшая компания оператор гидроэлектростанций — РусГидро владеет половиной гидрогенерирующих мощностей. Другие крупные гидрогенерирующие компании — ЕвроСибЭнерго и ТГК-1. Последние основные введенные гидрообъекты: Загорская (2000), Бурейская (2007) и Богучанская (2014) станции. В европейской части страны производится существенное повышение рабочей мощности Волжских ГЭС. На севере рассматривается достройка Белопорожской ГЭС.

Огромным потенциалом обладают множественные российские морские и океанические заливы с высокими, достигающими высоты в 10 метров приливами. С 1968 года действует экспериментальная приливная электростанция — Кислогубская мощностью 1,7 МВт[1].

Топливная энергетика включает комплекс отраслей, занимающихся добычей, переработкой и реализацией топливно-энергетического сырья и готовой продукции. Включает угольную, газовую, нефтяную, торфяную, сланцевую и уранодобывающую промышленность.

Особую роль для энергетики России играют компании, занимающиеся добычей нефтегазовых отраслей. Крупнейшие нефтяные компании России: государственные — «Роснефть» и «Газпром нефть», частные — «Лукойл», «Сургутнефтегаз», «Татнефть». Основную долю (93 %) транспорта жидких углеводородов контролирует государственная компания «Транснефть», оперирующая магистральными нефтепроводами. Крупную сеть нефтепродуктопроводов контролирует также государственная компания «Транснефтепродукт», ранее отдельная, а с 16 апреля 2007 года входящая в состав «Транснефти»[1].

Добычей твердого топлива для тепловых станций являются множество компаний, Крупнейшие разрабатываемые месторождения энергетического угля — месторождения Кузбасса и месторождения Канско-Ачинского угольного бассейна (Березовское, Бородинское, Назаровское).

Крупнейшие угледобывающие компании «СУЭК», «Кузбассразрезуголь», «Южкузбассуголь», «Южный Кузбасс».

- возобновляемые источники энергии, такие как:

1) Древесина:

Наиболее высокая продуктивность, где возможно эффективное выращивание энергетических лесов, отмечается на Северном Кавказе, в Алтайском крае и центре европейской части. Одним из перспективных направлений развития использования древесины можно считать технологии гидролиза.

2) Торф:

Основные запасы сконцентрированы в западной Сибири и на северо-западе европейской части. Ресурсы торфяных месторождений несколько более концентрированы, однако при этом зачастую еще более труднодоступны, чем лесные.

3) Геотермальная энергетика:

На 20 месторождениях ведется промышленная эксплуатация, среди них: Паратунское (Камчатка), Казьминское и Черкесское (Карачаево-Черкессия и Ставропольский край), Кизлярское и Махачкалинское (Дагестан), Мостовское и Вознесенское (Краснодарский край). Все Российские геотермальные электростанции расположены на территории Камчатки и Курил, суммарный электропотенциал пароводных терм только Камчатки оценивается в 1 ГВт рабочей электрической мощности.

4) Ветровая энергетика:

Особой концентрацией ветропотенциала отличаются побережья Тихого и Арктического океанов, предгорные и горные районы Кавказа, Урала, Алтая, Саян. Крупнейшие действующие ветропарки расположены в Крыму: Останинская ВЭС мощностью 25 МВт, Сакская ВЭС — 19 МВт и Тарханкутская ВЭС — 15 МВт.

5) Энергия солнца:

Крупнейшие солнечные электростанции расположены в Крыму («Владиславовка», «Перово», «Охотниково», «Николаевка», «Митяево»).

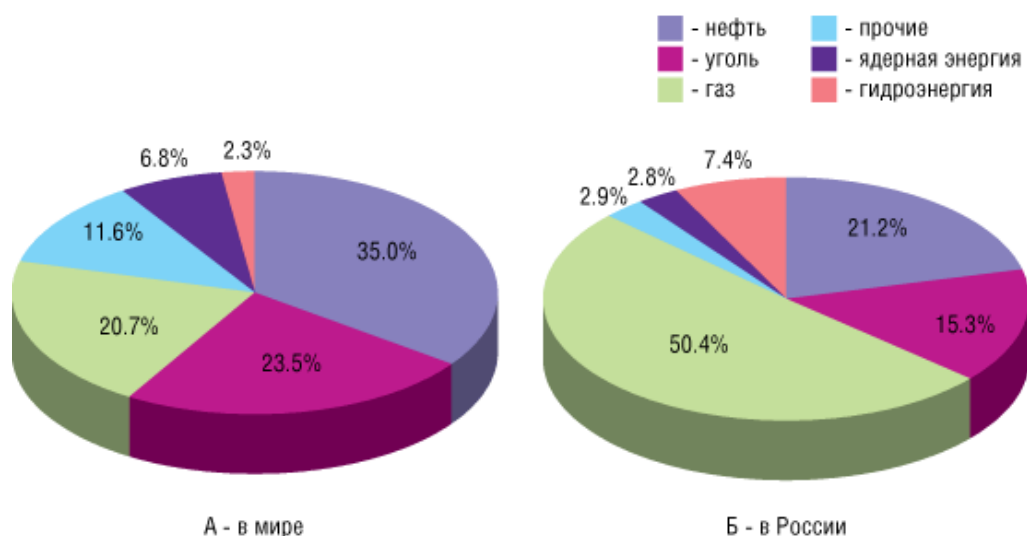


Рисунок 1 - Структура энергетики

Список литературы:

1. Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. - <http://wikipedia.org> . – (дата обращения: 10.12.2015).

## САЯНО-ШУШЕНСКАЯ ГЭС

Платов И.В. - студент, Меняев К.В. – доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Актуальность:

Данная тема работы требует произвести анализ действующей законодательной и нормативной документации и предложения по их изменению в части повышения надежности и безопасности гидроэнергетических объектов.

Научные основы и методы обоснования продления срока службы гидроэнергетического оборудования и сооружений ГЭС за пределами проектного срока.

Анализ перспективных требований к вторичному регулированию частоты и мощности с участием ГЭС и разработка методов проектирования и управления агрегатами ГЭС.

Цель работы: Изучить конструкцию и принцип работы Саяно-Шушенской ГЭС.

Задачи:

- 1) Изучить теоретические и экспериментальные работы по данной теме.
- 2) Проанализировать причины аварии на ГЭС.
- 3) Посмотреть результаты восстановительных работ.

Методы исследования: Аналитический.

Практическая значимость работы:

Проведенная работа позволила изучить строение и принцип работы, обозначить основные недостатки и преимущества ГЭС.

Природные условия.

Саяно-Шушенская ГЭС использует падение верхнего Енисея в так называемом Саянском коридоре — участке течения, на котором река прорезает хребты Западных Саян. Саянский коридор имеет длину около 280 км, начинаясь у впадения в Енисей реки Хемчик и заканчиваясь в районе Саяногорска. Основные сооружения Саяно-Шушенской ГЭС расположены в Карловом створе, расположенном на расстоянии 455,6 километра от истока реки[1].

Климат в районе расположения ГЭС — континентальный, умеренный. Минимальная температура января составляет  $-42^{\circ}\text{C}$ , максимальные температуры июля-августа —  $35—36^{\circ}\text{C}$ . Годовая норма осадков составляет 655 мм. Устойчивый снежный покров устанавливается в первой половине ноября, достигая наибольшей высоты в марте. Таяние снега начинается в первой декаде апреля[1].

Конструкция станции .

Саяно-Шушенская ГЭС представляет собой мощную высоконапорную гидроэлектростанцию приплотинного типа. Конструктивно сооружения ГЭС разделяются на плотину, здание ГЭС с корпусами вспомогательного назначения, водобойный колодец эксплуатационного водосброса, береговой водосброс, открытое распределительное устройство (ОРУ). Судопропускными сооружениями гидроузла не оборудован и не позволяет проход судов в нижний и верхний бьефы.

Напорный фронт Саяно-Шушенской ГЭС образует бетонная арочногравитационная плотина, устойчивость и прочность которой обеспечивается действием собственного веса (на 60 %) и частично упором верхней арочной части в берега (на 40 %). Плотина имеет максимальную высоту 245 м, ее верховая грань очерчена дугой с радиусом 600 м, ширина плотины по основанию — 105,7 м, по гребню — 25 м. Длина гребня плотины с учетом береговых врезок составляет 1074,4 м.

В здании ГЭС размещено 10 гидроагрегатов, мощностью 640 МВт каждый, с радиально-осевыми турбинами РО-230/833-0-677.

Экологические последствия.

После сооружения Саяно-Шушенской ГЭС в ее нижнем бьефе в зимний период стала возникать незамерзающая полынья, связанная со сбросом относительно теплых вод с

водохранилища при работе гидроагрегатов ГЭС. Возникновение полыньи привело к усилению зажорных явлений в нижнем бьефе с периодическим подтоплением территорий. В зоне затопления водохранилища находилось более 3 млн м<sup>3</sup> древесины.

С целью изучения влияния водохранилища на прилегающие экосистемы, охраны популяций соболя и снежного барса, а также в качестве компенсационного мероприятия на прилегающей к водохранилищу территории в 1976 году был создан Саяно-Шушенский биосферный заповедник площадью 3904 км<sup>2</sup>[1].

Экономическое значение.

Саяно-Шушенская ГЭС является крупнейшей электростанцией России, к тому же вырабатывающей очень дешевую электроэнергию — себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии в 2001 году Саяно-Шушенского гидроэнергетического комплекса составляла 1,62 коп. ГЭС является самым мощным источником покрытия пиковых перепадов электроэнергии в Единой энергосистеме России.

Водоохранилище Саяно-Шушенской ГЭС имеет противопаводковое значение, защищая от наводнений расположенные ниже по течению территории. Так, в ходе половодья 2010 года приток в водохранилище составлял более 9000 м<sup>3</sup>/с, а сброс воды в нижний бьеф ГЭС составлял менее 6000 м<sup>3</sup>/с, при том, что при расходах более 7000 м<sup>3</sup>/с начинается подтопление территорий в нижнем бьефе. Саяно-Шушенская ГЭС представляет интерес как объект туризма. Саяно-Шушенская ГЭС является филиалом ОАО «РусГидро». Директор филиала — Валерий Кяри[1].

История строительства.

В 1956—1960 годах «Ленгидроэнергопроектом» была разработана схема гидроэнергетического использования верхнего Енисея. В 1962 году совет государственной научно-технической экспертизы подтвердил обоснованность предложенной схемы, начались работы по формулированию проектного задания.

В целом Саянской экспедицией «Ленгидропроекта» в течение 6 лет был выполнен большой объем инженерно-геологических работ. В 1962—1965 годах «Ленгидропроектом» велись активные работы в рамках разработки проектного задания Саяно-Шушенской ГЭС.

В 1968 году по предложению Министерства энергетики СССР и заводов-производителей оборудования было решено увеличить единичную мощность гидроагрегатов до 640 МВт, что позволило уменьшить их количество до 10.

В 1969 году состоялась первая экспертиза технического проекта Саяно-Шушенской ГЭС, по итогам которой было принято решение о доработке проекта. В 1970 году состоялась повторная экспертиза, порезультатом которой 11 января 1971 года технический проект Саяно-Шушенской ГЭС был утвержден коллегией Минэнерго СССР.

Первый гидроагрегат Саяно-Шушенской ГЭС (со сменным рабочим колесом) был поставлен под промышленную нагрузку 18 декабря 1978 года. Все уникальное оборудование станции было изготовлено на заводах СССР[1].

Эксплуатация.

Саяно-Шушенская ГЭС начала выдавать электроэнергию в энергосистему с декабря 1978 года, войдя в состав производственного объединения «Красноярскэнерго». По информации РусГидро к 1986 году, выработав 80 млрд кВт·ч, станция окупил затраты на свое строительство. 18 мая 2001 года станции было присвоено имя П. С. Непорожного. В 2003 году Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс был выделен в ОАО «Саяно-Шушенская ГЭС». 16 июля 2006 года Саяно-Шушенская ГЭС выработала 500 миллиардов кВт·ч электроэнергии. 9 января 2008 года ОАО «Саяно-Шушенская ГЭС им. П. С. Непорожного» было ликвидировано путем присоединения к ОАО «ГидроОГК» (позднее переименованного в ОАО «РусГидро»); станция вошла в состав компании на правах филиала[1].

Ремонт плотины и ее основания.

После наполнения водохранилища до отметки НПУ в 1990 году резко увеличился фильтрационный расход через тело плотины и зону контакта плотины и основания, достигнув в 1995 году 549 л/с в основании и 457 л/с в теле плотины против предполагавшихся проектом 100—150 л/с в основании и незначительных объемов в теле плотины.

В 1991—1994 годах предпринимались попытки заделки трещин в плотине и ее основании с помощью цементации, которые не привели к успеху — цементирующий состав вымывался из трещин. В 1993 году было принято решение воспользоваться услугами французской компании «Солетанш», имевшей большой опыт строительных и ремонтных работ гидротехнических сооружений.

Опираясь на этот опыт, в 1998—2002 годах были проведены работы по инъектированию трещин в основании плотины уже с помощью отечественного состава КДС-173.

Всего на ремонтные работы в плотине и ее основании было затрачено 334 тонны эпоксидных составов[1].

7 Авария 17 августа 2009 года.

В 8:13 местного времени (MSK+4) 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС произошла тяжелая авария (техногенная катастрофа). Находившийся в работе гидроагрегат № 2 внезапно разрушился и был выброшен напором воды со своего места.

В результате аварии погибло 75 человек, большинство из которых составили сотрудники подрядных организаций, занимавшиеся ремонтными работами. Все гидроагрегаты станции получили повреждения различной степени тяжести; наиболее сильные, вплоть до полного разрушения — гидроагрегаты № 2, № 7 и № 9.

Непосредственной причиной разрушения гидроагрегата № 2 было названо усталостно-разрушение шпилек крепления крышки турбины в результате вибрации, возникавшей при переходах режима мощности гидроагрегата через диапазон «запрещенной зоны»[1].

Восстановление гидроагрегатов

В дальнейшем монтировались новые гидроагрегаты, изготовленные предприятиями концерна «Силловые машины»: гидроагрегат № 1 был пущен 19 декабря 2011 года.

№ 7 — 15 марта 2012 года.

№ 8 — 15 июня 2012 года.

№ 9 — 21 декабря 2012 года.

№ 10 — 4 марта 2013 года.

№ 6 — в июле 2013 года.

№ 5 — в декабре 2013 года.

№ 4 — в мае 2014 года.

№ 3 — в августе 2014 года.

12 ноября 2014 года был введен в строй гидроагрегат № 2, на чем восстановление и комплексная модернизация станции были в целом завершены.

Выводы

В 2007 году в аналитической записке Счетной Палаты РФ, посвященной в том числе и исследованию хода выполнения инвестиционной программы ОАО «РусГидро», было отмечено, что на многих станциях компании «имеет место эксплуатация морально устаревшего и физически изношенного оборудования, выработавшего нормативный парковый ресурс 25—30 лет, износ которого составил почти 50 %», а «степень износа отдельных видов гидротехнического оборудования — гидротурбин и гидрогенераторов, гидросооружений — превысила 60 % или достигла критического уровня».

Техническое состояние Саяно-Шушенской ГЭС и до аварии было предметом критических публикаций, однако их авторы акцентировали внимание на состоянии плотины, которое не имело отношения к причинам произошедшей аварии[1].

### Список литературы:

1. Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. - <http://wikipedia.org> . – (дата обращения: 14.12.2015).

## ЭНЕРГЕТИКА КРЫМА, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Смыкалов Д.С. - студент, Меняев К.В. – доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Актуальность: энергетика Крыма — крупная отрасль экономики Крыма. Полуостров обладает существенными запасами энергетических ископаемых и потенциалом возобновляемых источников. Ведется добыча газа и нефти, а также производство электро- и теплоэнергии. Энергетическая система Крыма сильно зависит от внешних поставок электроэнергии и нефтепродуктов.

Цель работы: Ознакомиться с энергетикой Крыма, проанализировать перспективы и проблемы развития отрасли.

Задачи:

- 1) Ознакомиться с производством электроэнергии на полуострове.
- 2) Проанализировать электрические сети связывающие Крым с континентом.
- 3) Посмотреть импортеров энергии.

Методы исследования: Аналитический.

Практическая значимость работы:

Проведенная работа позволила глубже ознакомиться с проблемами энергосистемы Крыма.

Электроэнергетика

В структуре потребления электроэнергии на население приходится 46 %, на промышленность — 17,6 %, на сельское хозяйство — 6,7 %. В регионе отсутствуют сезонные колебания, что обычно не характерно для предприятий энергетической отрасли. В зимние месяцы увеличивается доля электроэнергии, расходуемой на освещение и отопление, летом возрастает потребление в курортной зоне и на нужды оросительных систем.

Поставщики электроэнергии.

Первичные энергоносители	2012	2013
Атомные электростанции	46,97 %	44,27 %
Тепловые электростанции	39,73 %	40,34 %
Гидроэлектростанции	5,85 %	7,88 %
Теплоэлектроцентрали	7,02 %	6,65 %
Малые ГЭС	0,10 %	0,16 %
Ветряные электростанции	0,14 %	0,36 %
Солнечные электростанции	0,18 %	0,32 %
Биомасса	0,01 %	0,02 %
Другие	0,00 %	0,0 %

Рисунок 1 - Производство электроэнергии



Собственное производство электроэнергии на полуострове составляет 1131 млнкВт·ч в год, что обеспечивает 21 % от общего потребления. Одним из базовых поставщиков электроэнергии является Запорожская АЭС (Украина).

По советским планам развития энергетики Крым должен был полностью обеспечивать себя за счет собственной АЭС. Но после Чернобыльской аварии было принято решение отказаться от завершения строительства Крымской АЭС, несмотря на то, что готовность первого блока составляла 90 % и было завезено ядерное топливо. В 2014 году отказ от продолжения строительства был обусловлен отсутствием готовых проектов блоков малой и средней мощности.

Мобильные газотурбинные станции.

Весной 2014 года в Крыму были установлены мобильные газотурбинные станции: 9 станций были доставлены из олимпийского Сочи, еще 4 неиспользуемые станции были привезены из Подмосковья. 22 октября приступили к транспортировке 14-й станции из Кызыла.[13] Затраты на их перемещение составили 2 млрд рублей.

Мобильные ГТЭС общей мощностью 292,5 МВт (13×22,5 МВт Pratt&WhitneyPowerSystems, 75 т[13]) размещаются на трех площадках возле одноименных подстанций:

«Симферопольская» (село Денисовка — 6 МГТЭС),

«Севастопольская» (село Штурмовое — 3 МГТЭС),

«Западно-Крымская» (село Карьерное, Сакский район — 4 МГТЭС) .

Кроме мобильных газотурбинных станций в Крыму размещены 1,5 тыс. дизель-генераторов общей мощностью 310 МВт, в том числе 215 дизель-генераторов общей мощностью 32 МВт в Севастополе. Они не подключены к сети Крымэнерго, а используются в аварийном режиме для снабжения социально-значимых объектов.

Тепловые электростанции.

Тепловые электростанции, работающие на газе:

Симферопольская ТЭЦ: 100 МВт, 364 Гкал/ч. Две газовые турбины ГТУ-100-750-3М общей мощностью 210 МВт, предназначенные для покрытия пиковых нагрузок, выведены из эксплуатации.

Севастопольская ТЭЦ: 33 МВт, 153,3 Гкал/ч.

Камыш-Бурунская ТЭЦ: 23 МВт с 10 декабря 2015, 103 Гкал/ч. Планируется увеличить мощность до 120 МВт.

Сакская ТЭЦ: 12 МВт, 20 МВт (ПГУ), 88,1 Гкал/ч.

БКППЭА-500: 0,5 МВт, 0,5 Гкал/ч. Расположена в Евпатории. Используется для автономного питания силового электрооборудования котельной. Тепловая энергия используется для горячего водоснабжения.

В 2015 году Симферопольская, Сакская и Камыш-Бурунская ТЭЦ были временно выведены из эксплуатации для проведения ремонтов. К концу июня были завершены ремонтные работы на Симферопольской ТЭЦ. Завершались работы в Саках, в сентябре должны были завершиться работы на Камыш-Бурунской электростанции.

Возобновляемые источники.

На полуострове в 2010—2012 годах были построены четыре солнечных парка: «Родниковое», «Охотниково», «Перово», «Митяево», общей мощностью 227,3 МВт.

До апреля 2014 года альтернативная энергетика Крыма субсидировалась за счет «зеленого тарифа», когда электроэнергия у производителя покупалась на порядок дороже, чем за нее платил потребитель. После отказа руководства Крыма от завышенных тарифов солнечные станции были остановлены до августа — когда производители электроэнергии согласились снизить цену с 14,5 до 3,42 рублей за кВт·ч. При этом тариф для населения составлял от 0,95 до 3,26 рублей, для предприятий — от 3,3 до 4,22 рублей за кВт·ч[1].

В сентябре 2014 года общая фактическая мощность солнечных электростанций составляла 160—180 МВт, ветрогенераторов — до 50 МВт, при установленной мощности солнечных электростанций 227,3 МВт, ВЭС — 87 МВт.

Электрические сети.

Передачу электрической энергии по магистральным сетям осуществляет ГУП РК «Крымэнерго», на баланс которого были переданы национализированные активы НЭК «Укрэнерго».

Передачу электрической энергии в Крыму по распределительным сетям также обеспечивает ГУП РК «Крымэнерго», на баланс которого были переданы национализированные активы ПАО «ДТЭК Крымэнерго». На конец 2013 года общая протяженность ЛЭП «ДТЭК Крымэнерго» составляла 30 581 км, общее количество подстанций — 9 053 шт., суммарная мощность подстанций — 6 178 МВА.

Энергомост.

Осенью 2014 года был объявлен конкурс на строительство энергомоста через Керченский пролив. В параметрах конкурса указывалось, что он должен быть рассчитан на рабочее напряжение 220 кВ, строительство должно быть завершено к октябрю 2016 года, а его стоимость не должна превышать 13,8 млрд рублей. К участию в конкурсе были допущены АО «ВО „Технопромэкспорт“» и ОАО «Стройтрансгаз».

Для подачи мощности в энергосистему Крыма планируется строительство магистральной ЛЭП Керчь — Симферополь протяженностью 240 км. В сентябре 2014 года были начаты подготовительные работы для ее строительства, после чего была выбрана трасса и оформлены земельные участки.

В первом квартале 2015 года была завершена Главгосэкспертиза. В 2015 году в Крыму планируется построить 250 км ЛЭП от Керчи до Феодосии.

Окончание строительства первой очереди мощностью 350 МВт первоначально планировалась к концу 2016 года, но впоследствии было объявлено, что строительство первой очереди мощностью до 300 МВт планируется завершить к концу 2015 года. Полностью завершить строительство энергомоста в Крым планируется летом 2016 года..

Импорт электроэнергии.

Энергосистема Крыма является дефицитной, исторически основной объем потребляемой электроэнергии покрывался за счет перетоков из других регионов Украины (от Запорожской ТЭС, Запорожской АЭС, из энергосистемы Николаевской области) по четырем высоковольтным линиям электропередач:

Мелитополь — Джанкой (330 кВ, аварийно-допустимое значение мощности — 770 МВт[48]),

Каховка — Джанкой (330 кВ),

Каховка — Островское (330 кВ),

Каховка — Титан (220 кВ, тупиковая ветка, питающая Армянск и Краснопереконск, максимальная пропускная способность — 300 МВт[49]).

Выводы по результатам работы. В результате проведенной работы было установлено что возможности энергосистемы Крыма до конца не развиты, что свидетельствует перебои электроэнергии на полуострове. Зависимость в энергии Крыма от ненадежного поставщика в лице Украины, на сегодняшний день является главной проблемой всей энергосистемы полуострова. Перспективой развития является добыча газа и нефти, строительства новых ТЭС, ВЭС, СЭС для собственной регенерации и повышение стабильности электроснабжение.



Рисунок 1 -Энергетика Крыма

#### Список литературы:

1. Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. - <http://wikipedia.org> . – (дата обращения: 14.12.2015).

### СИСТЕМА УДАЛЕННОЙ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МОДУЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Тиханов М.В. - студент, Шпехт А.В. –студент, Паутова Е.Е.– ассистент  
 Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В настоящее время актуальны вопросы рационального или цивилизованного энергопотребления. В это понятие входят: обеспечение достаточных комфортных условий внутри помещений, снижение непроизводительных трат энергии, надежное, стабильное функционирование оборудования, обеспечивающего теплоснабжение и, наконец, минимизация капитальных и эксплуатационных затрат.

Целью исследования является анализ особенностей использования модульных котельных, в частности разработка системы удаленной диспетчеризации.

Задачи, которые поставили перед собой авторы работы:

проанализировать особенности производства и специфику использования модульных котельных установок;

разработка системы удаленной диспетчеризации, объектом контроля для которой является модульная котельная;

Актуальность рассматриваемой проблемы связана с тем, что наиболее выгодным вариантом замены изношенного, морально устаревшего отопительного оборудования являются модульные котельные. Так как данный тип котельных служит для теплоснабжения отдельных зданий или производственных помещений, расположенных в основном в сельских и труднодоступных местностях, то мониторинг режимов работы оборудования обычными средствами становится затруднительным либо невозможным.

Новизна исследования заключается в разработке системы сбора и передачи данных в виде, удобном для пользователя.

Модульные котельные установки (МКУ) - это небольшие котельные установки для местного теплоснабжения жилых домов, общественных или производственных зданий. Блок можно устанавливать на землю возле потребителя тепла или на крыше дома. В МКУ котлоагрегаты могут быть мультитопливными (незаменимы в тех регионах, где бывают перебои с поставками газа).

Модульные котельные установки можно разделить на модульные котельные контейнерного типа (МККТ) и модульные котельные блочного типа (МКБТ).

МККТ представляет собой транспортабельный модуль-контейнер, состоящий из стального каркаса и ограничительных конструкций. Имеется вентиляционное оборудование,

система отопления. Смонтированы котлоагрегаты, теплообменники, насосы, системы автоматики и водоподготовки. Автоматика МККТ полностью обеспечивает выполнение всех операций по производству необходимого количества тепла для систем отопления и ГВС (горячего водоснабжения). Модуль стабильно работает в автоматическом режиме, поэтому не требуется постоянного присутствия дежурного персонала.

Модульные котельные блочного типа (МКБТ) – котельные, состоящие из нескольких модулей, разделенных на блоки. Котельная установка может комплектоваться разным числом модулей, это зависит от мощности и интересующих Заказчика характеристик. Модульная котельная установка может работать на любом виде топлива – твердое топливо, газ, дизтопливо, мазут. Также может использоваться одновременно несколько типов топлива. Модульная котельная полностью комплектуется необходимыми устройствами контроля, учета и автоматизации процессов.

Процесс автоматизации контроля работы всех инженерных структур осуществляется при помощи большого количества датчиков, связанных между собой. Таким образом, можно значительно повысить качество обслуживания технологического оборудования и предотвратить возникновение аварийной ситуации; сократить время на установление причин аварии; сократить потребление энергоносителей и значительно уменьшить количество обслуживающего персонала. Все это возможно при установлении системы диспетчеризации.

В общем виде система диспетчеризации включает в себя шкаф управления и диспетчерский пункт. Шкаф управления системой диспетчерского контроля и управления обеспечивает сбор информации на месте размещения оборудования и передачу данных на диспетчерский пункт управления. Диспетчерский пункт служит для получения данных от шкафов системы диспетчеризации, отображения данных в режиме реального времени, оповещения о нештатных ситуациях, архивирования и протоколирования данных.

Шкаф управления и диспетчеризации размещается непосредственно на контролируемом объекте. Диспетчерский пункт – на рабочем месте дежурного персонала. Ввиду большой удаленности контролируемых объектов относительно диспетчерского пункта, организация проводных каналов связи для контроля параметров не представляется возможным, ввиду чего сбор информации организуется на основе беспроводных каналов связи. Одним из самых распространенных способов является передача данных через распределенные сети GSM, для чего шкаф управления и диспетчерский пункт оснащаются GSM - модемами.

Архитектура системы удаленной диспетчеризации (СУД), представленная в настоящей работе, подразумевает наличие трех блоков: объект контроля, серверная часть, клиентская часть.

Применительно к СУД, объект контроля, которым в настоящей работе выступает проектируемая модульная котельная, осуществляет регистрацию, сбор и отправку контролируемых параметров.

Функционально, серверная часть выполняет сбор, первичный анализ, архивацию, генерацию отчетов и трансляцию полученных данных для клиентской части СУД. В составе системы автоматического регулирования должны иметься приборы, выполняющие функции аналого-цифрового преобразования. Кроме преобразования сигналов в цифровой вид, такие устройства должны обеспечивать передачу полученных данных в локальную технологическую сеть, для последующего сбора и передачи в серверную часть. Такой локальной технологической сетью является RS485.

Сбор данных из локальной технологической цепи осуществляется, в обычном случае программируемым логическим контроллером (ПЛК). Этот элемент системы предназначен для генерации комплексных управляющих воздействий, в соответствии с управляющей программой, на автоматизированные органы управления.

Выбор и функционал, ПЛК зависит во многом от оборудования и особенностей технологического процесса. С точки зрения СУД, функцией ПЛК является, помимо сбора и первичной обработки данных, полученных от приборов АЦП, формирование пакета данных

направляемых в серверную часть комплекса СУД. Передача данных серверной части осуществляется посредством GSM модема, который строит свою работу на основе беспроводных сетей передачи информации. Модем работает на основе прозрачного соединения типа «точка-точка», которое накладывается поверх стека TCP/IP.

Число поддерживаемых интерфейсов различно и зависит от выбранной модификации оборудования. При желании представленное оборудование может интегрироваться в разнообразные m2m системы и подсистемы. Соединение выполняется по принципу «точка-точка», наложенному поверх стека TCP/IP.

Таким образом, модем, подключенный непосредственно к ПЛК принимает от него пакет данных. Учитывая специфику работы GSM модемов, пакет по своей сути является так называемой AT командой.

В данной работе, реализацию серверной части комплекса принято создать на основе бесплатных интернет сервисов.

Серверная часть комплекса по своей структуре является набором сервисных программ-скриптов выполненных на php, и базой данных mySQL.

Так же, следует сказать, что серверная часть, предназначена для обслуживания нескольких контролируемых объектов. При этом количество их определяется только допустимыми объемами базы данных и разрешенной нагрузкой на сервер службы.

Клиентская часть комплекса СУД предназначена для непосредственной визуализации контролируемых параметров технологического процесса. Так, как доступ к серверной части осуществляется по средствам сети интернет, то отслеживание параметров может быть обеспечено из любой точки мира при условии наличия подключения к сети. Реализация данной части осуществлена в виде мобильного приложения для устройств, хотя при необходимости подобные функции можно обеспечить путем создания сайта имеющего подобные возможности.

Непосредственно схема работы клиентской части сводится к формированию запроса к серверной части, получению пакета данных, обработки и формированию графического представления контролируемых параметров.

Выбор технологического оборудования для реализации системы удаленной диспетчеризации модульной котельной, во многом определен системой автоматического регулирования. Тем не менее, оборудование должно делать возможным реализацию СУД.

В качестве первичных преобразователей температуры предполагается использование погружных термосопротивлений марки ДТС с защищенными гильзами производства НПО «ОВЕН». В качестве первичных преобразователей давления сетевой воды предполагается использование датчиков избыточного давления марки ПД100-ДИ производства НПО «ОВЕН».

Рекомендуемая рабочая среда для датчиков – различные жидкости, пар, газы, парогазовые и газовые смеси, не агрессивные к материалу измерительной мембраны и уплотнения сенсора, при давлении, не превышающем верхний предел измерения датчика.

Для регистрации и передачи показаний с датчиков температуры и давления предполагается использование модулей серии MB110, производства НПО «ОВЕН». В основу MB110 положен широко распространенный стандарт проводной связи RS-485. Все модули используют для коммуникации простые протоколы, основанные на принципе «запрос-ответ». Тип протокола определяется прибором автоматически. Прибор не является Мастером сети, поэтому сеть RS-485 должна иметь Мастер сети, например, персональный компьютер с запущенной на нем SCADA-системой, контроллер или регулятор. В данном случае в качестве Мастера сети предполагается использование контроллера ОВЕН ПЛК. Конфигурирование прибора осуществляется на персональный компьютер через адаптер интерфейса RS-485/RS-232 или RS-485/USB с помощью программы конфигуратора.

Блок логического управления и обработки предполагается выполнить на базе программируемого логического контроллера СПК107 с сенсорным управлением (панель

оператора) НПО «ОВЕН». СПК107 представляет собой устройство класса человеко-машинный интерфейс со встроенными функциями свободно программируемого контроллера. СПК107 предназначен для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами в различных областях промышленности и энергетики.

Передачу данных серверной части комплекса предполагается осуществлять при помощи Модема TELEOFIS RX100-R2. Модем построен на базе модуля Telit GL868-Dual. Стандартный последовательный порт обеспечивает трансляцию данных к прибору. На текущий момент GSM модем RX100-R2 совместим со всеми типами популярных приборов учета ресурсов с портом RS-232. Модем имеет встроенный TCP/IP стек с управлением AT командами, автоматическая подача которых может быть реализована на встроенном интерпретаторе языка Python.

В заключении следует отметить, что модульная котельная является одним из наиболее выгодных вариантов замены изношенного отопительного оборудования. Представленная система диспетчеризации позволяет обеспечить многоуровневый комплексный контроль над основными параметрами котельной. Так как большая часть модульных котельных используется в сельской либо труднодоступной местности, то данный тип диспетчеризации является самым удачным. Применение СУД позволяет быстро и достоверно диагностировать состояние объекта; снизить расходы на эксплуатацию; уменьшить количество обслуживающего персонала, тем самым повысив эффективность его работы.

## ЯВЛЕНИЕ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ

Сарсембенов Е.К. - студент, Меняев К.В. – доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Состояние двухфазной системы, при котором происходит перемещение твердых частиц относительно друг друга в ходе обмена энергией с каким-либо ее источником называется псевдоожигением[1].

Псевдоожигение - это процесс, при котором по сути твердая статическая масса переводится в псевдосостояние, подобное состоянию жидкой массы. В отличие от сжижения в псевдоожигенное состояние переводится не газ, а сыпучая (при определенных обстоятельствах) масса. Название "кипящий слой" было присвоено благодаря тому, что слою присущи некоторые свойства капельной жидкости[1].

На практике псевдоожигенный слой образуется при восходящем потоке ожижающего агента через слой зернистого материала в момент достижения давления величины, достаточной для поддержания зернистого материала во взвешенном состоянии (рисунок 1)[2].

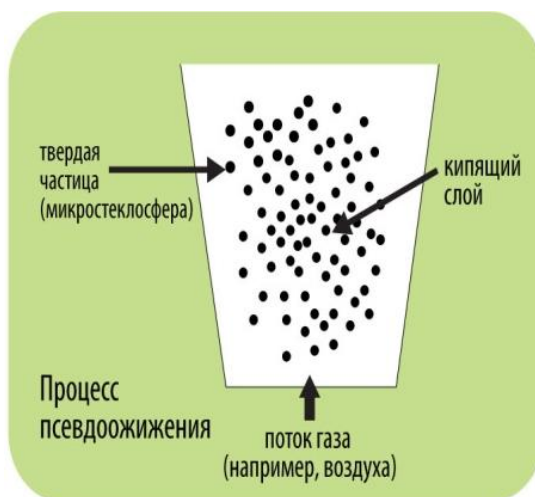


Рисунок 1 - Псевдоожигенный слой

В вертикальный сосуд любой (например, цилиндрической) формы, оснащенный поперечным газопроницаемым поддерживающим устройством в виде сетки, пористой перегородки и т.п., погружен слой мелкозернистого материала. При подаче через распределительную решетку снизу вверх потока газа (или жидкости) с малой скоростью слой остается неподвижным. Если постепенно увеличивать скорость газа до величины, при которой вес зернистого материала в слое уравнивается силой гидродинамического давления восходящего потока, твердые частицы окажутся в гидродинамическом равновесии и получат возможность взаимного пульсационного перемещения, т.е. слой станет "текучим" и приобретет некоторые свойства капельной жидкости. С дальнейшим увеличением скорости газа слой расширяется, интенсивность движения частиц возрастает, но без нарушения гидродинамического равновесия. Наконец, по достижении скорости газа, при которой силы гидродинамического давления становятся больше силы тяжести, частицы выносятся из слоя[3].

Скорость газа(жидкости), при которой неподвижный слой зернистого материала переходит в псевдооживленное состояние, называют скоростью начала псевдооживления (или первой критической). Скорость газа, при которой твердые частицы выносятся из слоя, называется скоростью уноса (или второй критической). Таким образом диапазон псевдооживления ограничен первой и второй критическими скоростями.

Зернистый материал для псевдооживления может быть загружен в аппарат единовременно (периодическое псевдооживление), либо может непрерывно вводиться и выводиться из аппарата (непрерывное псевдооживление).

Если скоростьоживляющего агента (газа или жидкости) незначительно превышает скорость начала псевдооживления, то движение частиц выражено слабо - слой находится в состоянии спокойного псевдооживления[1].

По мере увеличения скорости газа в слое начинают появляться небольшие газовые пузыри, повышающие интенсивность перемешивания частиц. Свободная поверхность слоя в этом случае очерчена достаточно резко, испытывая сравнительно небольшие колебания. Такой слой получил название собственно кипящего слоя. В литературе термину "кипящий слой" часто придают более широкий смысл, понимая его как псевдооживленный слой в любых модификациях[1].

Характер псевдооживления в значительной мере зависит от свойств твердых частиц, составляющих слой. В частности, крупные частицы одинакового размера склонны к образованию слоя с барботажем крупных пузырей. Добавление к такому слою порции более мелких частиц несколько увеличивает его однородность, газовые пузыри становятся меньше. Вообще псевдооживление полидисперсного слоя происходит более плавно (мягче).

Псевдооживление зернистых материалов возможно так же с помощью какого-либо механического побудителя, например лопастной мешалки или вибратора(механическое псевдооживление). В таких системах твердые частицы могут интенсивно перемещаться в слое, который обладает многими свойствами, характерными для псевдооживления газами (пневматическое псевдооживление) и капельными жидкостями (гидравлическое псевдооживление), например текучестью, увеличением объема и др. Не касаясь специфических особенностей механического псевдооживления, заметим, что одним из его преимуществ является возможность осуществления процессов в вакууме[1].

Сжигание твердого топлива в псевдооживленном слое. Метод псевдооживления твердого топлива получил довольно широкое распространение в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, строительной, фармацевтической промышленности, черной и цветной металлургии, энергетике и ряде других отраслей. Исследовались значительные выгоды использования псевдооживленного слоя применительно к весьма широкому кругу технологических процессов и объектов. Однако при практическом внедрении метода выявились и определенные недостатки псевдооживленного слоя.

Последующее изучение псевдооживленных систем, работа над практическим внедрением метода привели к более сбалансированным оценкам. Было показано, что многие недостатки этого метода могут быть устранены или сведены к минимуму разработкой и внедрением рациональных технологических режимов и конструктивных решений. Это позволило расширить перечень технологических проблем, которые целесообразно решать, используя метод псевдооживления[1].

Широкое внедрение метода псевдооживления в промышленную практику обусловлено следующими достоинствами[1]:

1. Интенсивное перемешивание твердой фазы, приводящее к практическому выравниванию температур и концентраций в объеме псевдооживленного слоя. Благодаря этому, в частности, устраняется опасность локального перегрева (или переохлаждения) твердых частиц, препятствующих оптимальному протеканию ряда тепловых, каталитических и других процессов.

2. Высокие значения коэффициентов эффективной теплопроводности и теплоотдачи от псевдооживленного слоя к поверхностям теплообмена(или наоборот), соизмеримые с соответствующими значениями коэффициентов для капельных жидкостей. Эта важная особенность псевдооживленного слоя позволяет экономить поверхности теплообмена, рабочие объемы аппаратов.

3. Возможность использования твердых частиц малых размеров.

4. Подвижность псевдооживленного слоя позволяет создать аппараты с непрерывным вводом свежей и отводом отработанной твердой фазы, используя при этом выносные устройства для теплообмена и регулирования температуры.

5. Небольшое гидравлическое сопротивление и независимость его величины от скорости оживающего агента(газа или жидкости) в пределах существования псевдооживленного слоя.

6. Широкий диапазон свойств применяемых твердых частиц и оживающих агентов (газы, пары и капельные жидкости), включая возможность питания аппаратов с псевдооживленным слоем пастообразными материалами и суспензиями.

7. Сравнительно простое устройство аппаратов с псевдооживленным слоем, легкость их механизации и автоматизации.

8. В сравнении с другими видами сжигания твердого топлива снижаются удельные капитальные затраты.

9. Низкие температуры сгорания приводят к снижению выбросов оксидов азота.

10. Добавка относительно небольшого количества известняка связывает сернистый ангидрид с зольным остатком.

11. Появляется возможность использования угля с повышенным содержанием серы, с высокой зольностью и с низкой теплотой сгорания.

12. Появляется возможность создания топочных камер с избыточным давлением, что открывает дальнейшие перспективы для снижения габаритов котельных установок.

Наряду с большими достоинствами методу псевдооживления присущи некоторые недостатки[1]:

1. Неравномерность времени пребывания в псевдооживленном слое частиц твердой фазы и оживающего агента. Одинаково возможны быстрый просок частиц и их пребывание в слое дольше среднестатистического времени.

2. Возможность в ряде случаев нежелательного изменения свойств твердых частиц (истирание, растрескивание, науглероживание, слипание, стекание и т.п.).

3. Необходимость установки мощных пылеулавливающих аппаратов на выходе газов из псевдооживленного слоя, особенно при широком гранулометрическом составе твердой фазы.

4. Эрозия аппаратуры в зоне псевдооживленного слоя, особенно значительная в случае использования частиц с высокими абразивными свойствами.

5. Ограниченность рабочих скоростей оживающего агента пределами, соответствующими началу псевдооживления твердой фазы и ее уносу из слоя.



6. Возникновение значительных зарядов статического электричества при псевдоожигении частиц диэлектрических материалов (взрывоопасность системы).

7. Большой унос частиц из слоя и связанный с ним механический недожог.

8. Проблематична разработка газораспределительной решетки, обеспечивающей удаление из слоя случайно попавших в него крупных предметов и отсутствие шлакования.

9. Проблематична загрузка топлива в слой, гарантирующая равномерное распределение концентраций горючих по всей его площади.

Перечисленные недостатки метода псевдоожигения не являются, как правило, определяющими, а некоторые из них могут быть частично или полностью устранены.

Достоинства метода псевдоожигения, безусловно, превалируют над его недостатками.

#### Список литературы:

1. Гельперин Н.И. Основы техники псевдоожигения, Изд-во «Химия», 1967 г.
2. Баскаков А.П. Котлы и топки с кипящим слоем, М.: Энергоатомиздат, 1995г.
3. Баскаков А.П. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник/ Под ред. И.П. Мухленова и др.-Л.: Химия, 1986 г.

### ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОКСОВОЙ ПЕЧИ

Таймасов Д.Р. - студент, Вдовина А.И. - студент, Марусова О.В. – студент,

Жуков Е.Б. – к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова ( г. Барнаул)

Коксовая печь – технологический агрегат, в котором осуществляется коксование каменного угля. Составление и анализ теплового баланса дают возможность определить теплотехнический и термический КПД установки, сравнивать теплотехнику различных систем коксовых печей

Под коксованием в общем виде понимают сложный процесс превращения топлива при нагреве до высоких температур без доступа воздуха. В данной работе коксовая печь представляет собой модифицированную топку водогрейного котла, в которой угольная шихта, проходя топку, теряет горючие газовые компоненты, оставляя в качестве продукта кокс. Тепло необходимое для нагрева и сушки выделяется при сгорании горючих компонентов и частиц кокса, унесенных с поверхности шихты.

Целью данной учебно-исследовательской работы является определение распределения теплоты, вносимой в печь, на полезно использованную и тепловые потери. На основании теплового баланса вычисляются коэффициент полезного действия печи и определяется конечная температура воды на выходе из печи.

В данной работе использован уголь с характеристиками:

- шихта: Кузнецкий каменный уголь марки Т класс ОМ с характеристиками:
- зольность на рабочую массу  $A_r = 11,6\%$ ;
- влажность на рабочую массу  $W_r = 6\%$ ;
- выход летучих  $V_{daf} = 11,5\%$ ;
- низшая теплота сгорания  $Q_{ir} = 28597$  кДж/кг;
- содержание серы  $S_r = 0,47\%$ .

Печь разбита на три зоны: 1 – зона сушки; 2 – топка; 3 – зона выдержки кокса. В зоне сушки происходит выход влаги из шихты и охлаждение газов за счет поглощения лучистого тепла трубной системой. В топке происходит образование горючих газов за счет высокой температуры, сгорание смеси топлив и передача тепла трубной системе и коксу. В зоне выдержки кокса кокс выдерживается при температурах 1000–1050 °С, при этом охлаждаясь трубной системой за счет теплопроводности.

В ходе расчета получены следующие результаты:

- температура газов на выходе из топки  $\vartheta_{\text{т}} = 1050^{\circ}\text{C}$ ;
- температура газов на выходе из печи  $\vartheta_{\text{ух}} = 718^{\circ}\text{C}$ ;
- коэффициент полезного действия печи по нагреву воды  $\eta = 26,43\%$ ;
- температура воды на выходе из печи  $t'' = 92^{\circ}\text{C}$ ;
- перепад температур на входе и выходе  $\Delta t = 21^{\circ}\text{C}$ .

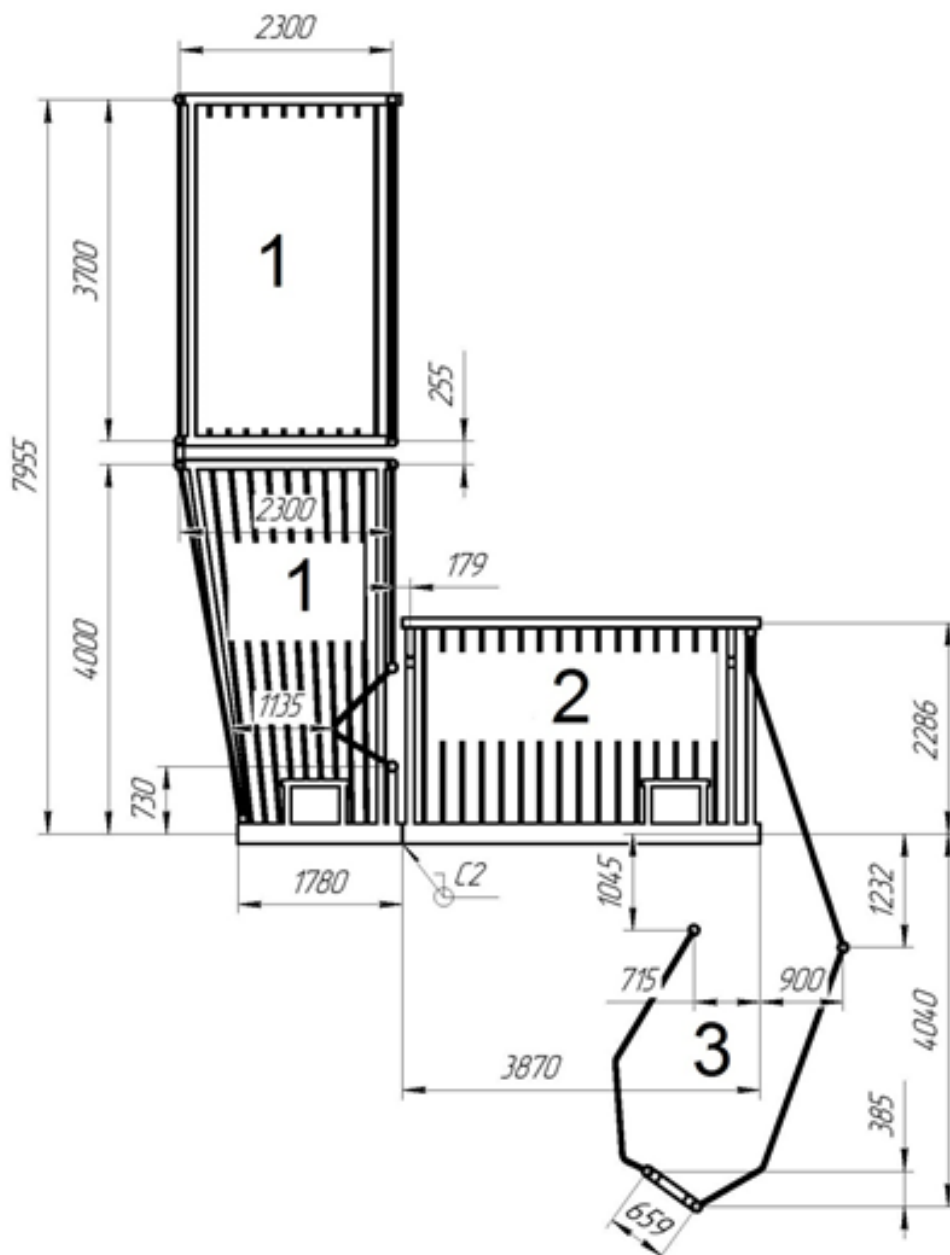


Рисунок 1 – Зоны коксовой печи

#### Список литературы:

1. Тепловой расчет котлов: (Нормативный метод) /Рос. АО "Единые энергет. системы России", АО открытого типа Всерос. теплотехн. науч.-исслед. ин-т, НПО ЦКТИ.- СПб. : [б. и.] , 1998 - 257 с. ил.
2. Нагорский Д.В. Расчет коксовых печей Москва, Ленинград: Издательство Академии наук СССР, 1941. - 96 с.

## ПРОБЛЕМЫ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Устинов В.А. – студент, Паутова Е.Е. – ассистент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В наше время все острее становятся проблемы обеспечения энергией населения нашей планеты. Из-за прироста населения и развития экономики наблюдается сильное увеличение спроса на энергию. В дальнейшем, из-за истощения природных ресурсов или во избежание сильнейшего загрязнения окружающей среды, человечеству придется отказаться от использования энергии сжигания органических топлив и атомной энергии.

На смену традиционной постепенно приходит альтернативная энергетика, но она в свою очередь имеет ряд недостатков, который не дает ей ощутимых преимуществ. Это послужило основанием для более глубокого изучения этой проблемы.

Целью написания работы является изучение аспектов проблем современной альтернативной энергетике, а также выявление ее преимуществ и недостатков по сравнению с традиционной. Авторы поставили перед собой ряд задач:

- выявить основные проблемы использования альтернативных видов энергии.
- сделать вывод о целесообразности использования альтернативной энергии.

Согласно определению, альтернативная энергетика – это совокупность нешироко распространенных способов получения, использования и передачи энергии, вызывающие интерес из-за выгоды их использования и низкого вреда окружающей среде. Главным критерием альтернативного источника энергии является возобновляемость или неисчерпаемость. К таким источникам относят всем хорошо известные природные явления: ветер, солнечный свет, тепло недр и другие.

Наиболее эффективным и широко распространенным источником энергии является движение воды. На долю гидроэнергетики приходится около 80% электроэнергии, полученной из возобновляемых источников, и около четверти всей электроэнергии в мире. Наиболее очевидными преимуществами применения ГЭС по сравнению с остальными способами получения энергии являются использование возобновляемого источника энергии и отсутствие выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Несмотря на использование возобновляемого источника энергии, традиционные ГЭС относят к традиционной энергетике, а малые ГЭС относят к альтернативной. Самой главной проблемой использования традиционных ГЭС является отчуждение значительных территорий под водохранилища. Малые ГЭС лишены этого недостатка. Их использование может удовлетворить нужды мелких потребителей электроэнергии. Наибольшее распространение они получили в Китае, где с их помощью вырабатывается около 30% электроэнергии в сельских районах. Как правило, мощность таких электростанций составляет около 1,2 МВт.



Рисунок 1 – Гидроэлектростанция

Приливные электростанции (ПЭС) также используют энергию движения воды. Они имеют те же преимущества и недостатки, что и традиционные ГЭС, но при этом обладают весьма серьезным изъяном, который не позволяет применять такие электростанции вне энергосистемы. Им является непостоянная мощность в течение суток.

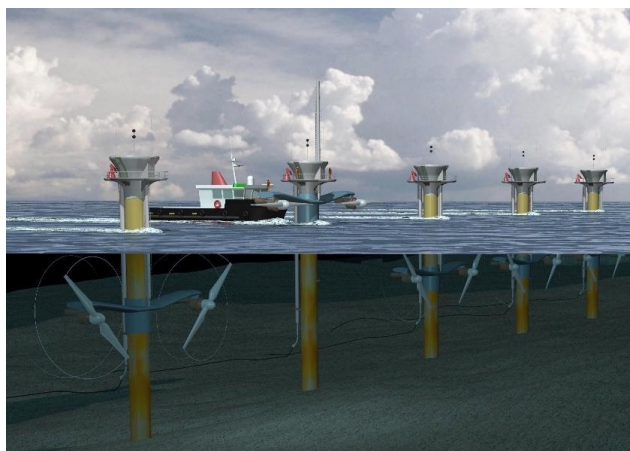


Рисунок 2 – Промышленная приливная электростанция

Второй по эффективности является энергия ветра. Сейчас мощность всех ветрогенераторов составляет около 3% от всей вырабатываемой мощности в мире.

Преимуществом энергии ветра является использование неисчерпаемого источника энергии, отсутствие выброса вредных веществ в окружающую среду, а также большая гибкость размеров ветряных электростанций – от небольших, имеющих высоту 9 метров, до гигантов с высотой 135 метров, которые способны обеспечивать электроэнергией целые районы. Кроме того, занимаемая ветрогенератором площадь небольшая, и нет никаких ограничений к ведению хозяйственной деятельности вокруг нее.



Рисунок 3 – Ветровая электростанция

Недостатками являются непостоянство мощности, высокая стоимость установки, сильные шумы и вибрации. Из-за последних факторов нежелательно размещение таких электростанций рядом с жилыми домами. К недостаткам еще можно отнести высокую стоимость электроэнергии, но в 2006 году в нескольких районах США ее стоимость оказалась ниже стоимости традиционной энергии. Это произошло из-за роста цен на традиционные топлива.

Солнечная энергетика основана на принципе непосредственного использования солнечного излучения для получения какой-либо энергии. Главным ее достоинством является ее доступность. В дополнение к этому, стоимость такой энергии с каждым годом снижается. Главным недостатком солнечных электростанций является влияние на

окружающую среду. Атмосфера над солнечными батареями сильно нагревается, что приводит к тепловому загрязнению. Также существуют проблемы утилизации фотоэлементов. Это связано с высоким содержанием кадмия в фотоэлементах. Многие производители нашли этому элементу замену в своих установках, но их эффективность существенно ниже их кадмиевых аналогов.



Рисунок 4 – Солнечная электростанция

Геотермальная энергетика вызывает интерес из-за полной неиссякаемости и независимости от времени суток и года. Воду или пароводяную смесь, полученную при помощи бурения скважин, используют для выработки электричества или теплоснабжения. Наиболее эффективно геотермальные электростанции проявляют себя в вулканических районах. Одной из проблем данного способа получения энергии является трудности использования данной воды в качестве питьевой. Из-за большого содержания токсичных солей металлов, отработанную воду нельзя сбрасывать в другой водоем, ее необходимо вернуть обратно в водоносный горизонт.



Рисунок 5 – Геотермальная электростанция

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что основными положительными качествами альтернативной энергетики являются отсутствие необходимости подвода топлива к электростанции и низкое воздействие на окружающую среду. В свою очередь главным недостатком является очень высокая цена за низкую эффективность производства энергии. Из-за непостоянства мощности, такие источники электроэнергии как ветрогенераторы и солнечные батареи трудно использовать по отдельности. Наиболее эффективным считается создание энергосистем при помощи комбинации этих источников.

Поэтому в заключении можно сказать, что в наши дни альтернативная энергетика лучше всего подходит для создания резервных или полностью автономных энергосистем в тех местах, где невозможно или нерентабельно использование традиционной энергетики, а также для индивидуальных нужд в тепле и электричестве.

## ПРЕИМУЩЕСТВА СЖИГАНИЯ КОРОДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ВИДЕ ПЕЛЛЕТ

Назаров А.А. – студент, Жуков Е.Б. – к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В статье рассмотрен опыт использования древесных и сельскохозяйственных отходов в качестве топлива, сложности утилизации таких отходов. Рассматривается перспектива сжигания экологически чистого биотоплива (пеллет). Проводится анализ сжигания древесных пеллет.

Ключевые слова: нетрадиционное топливо, древесные отходы, пеллеты.

Для минимизации затрат на топливную составляющую, все большее количество предприятий жилищно-коммунального сектора пытаются внедрять в топливный баланс своих котельных различные отходы и иные низкосортные виды топлив. Так же с целью снижения выбросов парниковых газов, отмечается рост количества переводов коммунальной энергетики с традиционных (ископаемых) видов топлива на альтернативное, возобновляемое [1].

На сегодняшний день на предприятиях деревообрабатывающей и лесозаготовительной промышленности, образуется большое количество кородревесных отходов, которые уже непригодны для вторичной переработки и сваливаются в отвалы. Использование таких отходов в качестве энергетического топлива, в исходном виде или в виде пеллет, имеет ряд преимуществ: данный ресурс является возобновляемым; минимальные затраты на его доставку от поставщика; исчезает необходимость утилизации отходов в отвалах. Однако в исходных древесных отходах содержание влаги может достигать 60%, что характеризует данный вид топлива как низкокачественное, поэтому сжигание его в обычных топочных устройствах неэффективно и необходимо применение специальных методов сжигания и соответствующих топочных устройств. Возможно предварительная подготовка данного топлива - повышение его удельной теплоты сгорания, или изготовление так называемых - древесных пеллет [1].

Пеллеты – это топливные гранулы цилиндрической формы (Рисунок 1), длиной 10 – 30 мм и диаметром 6 – 10 мм. Пеллеты изготавливаются из спрессованных отходов деревообрабатывающего производства. Прессовке подлежат, в основном, отходы хвойных пород деревьев, так как они легче поддаются переработке, чем твердые породы. Прессовка исходной стружки и опилок в пеллеты осуществляется под высоким давлением, около 300 атм., при этом использования химических составов и клея, благодаря чему, пеллеты являются одним из самых экологически чистых видов топлива.

Таблица 1 – Ключевые характеристики пеллет

Параметр	Показатель
Энергетическая ценность	не менее 4,7-4,9 кВт/кг
Плотность	1,1-1,3 кг/дм <sup>3</sup>
Влажность	не более 10%
Зольность	0,5%
Насыпная плотность	порядка 650 кг/м <sup>3</sup>
Теплопроводность	4,2-4,5 кВт/кг



Рисунок 1 –Пеллеты

Котлы, предназначенные для сжигания пеллет, считаются наиболее эффективными для работы на древесных гранулах, чем угольные котлы. Среди их неоспоримых преимуществ [2]:

- Высокая автоматизация. Топливо из бункера подается автоматически, благодаря этому, котел может работать длительный срок без вмешательства машиниста.
- Долговечность. Эксплуатационный срок котлов на пеллетах превышает 20 лет.
- Диапазон показателей мощности. Использование пеллет позволяет проектировать котлы для различных тепловых нагрузок от 20кВт до 0,5МВт.
- Высокий КПД. КПД котлов достигает 85-95%.
- Безопасность. Пеллетные котлы характеризуются высокой степенью пожаро- и взрывобезопасности.

Экономическая целесообразность использования пеллет

Резкий скачок объемов коттеджного строительства привел к значительному повышению спроса на эффективные отопительные системы.

Произведенные расчеты показали – себестоимость 1 ккал тепловой энергии при сжигании древесных гранул:

- в 2,5 раза ниже, чем при использовании электроэнергии;
- в 2 раза ниже, чем при использовании дизельного топлива;
- в 1,5 раза ниже, чем при использовании сжиженного газа.

Эффективность применения пеллет, в том числе обеспечивается их умеренной стоимостью и невысокими расходами на обслуживание. Полные затраты на пеллетное отопление значительно меньше, чем при сжигании топлива других видов.

Таблица 2 - Сравнительные затраты на отопление при использовании различных видов топлива, 2010 год

Вид топлива	Расход топлива Кг/час	Коэффициент загрузки котельной по мощности, (%)	Расход топлива за сезон (190 суток)	Стоимость тепла, тыс.руб.
Диз. топливо	2,15	60	5,9	106,2
Мазут	2,85	60	7,8	62,4
Уголь	8,60	60	23,5	82,3
Пеллеты	4,30	60	11,8	47,2
Дрова	20,9	60	57,2	114,4
Природный газ	2,16м3/час	60	5,9 тыс.м3	10,4
Электричество	25 квт/час	60	68400 квт/час	102,6

На данный момент одним из наиболее популярным видом топлива является природный газ. В сравнении с газом, пеллеты имеют ряд преимуществ – возможность запаса, что в случае с газом невозможно или взрывоопасно, а также значительного капиталовложения при подключении к газовой магистрали. Стоимость газа динамично увеличивается. Исходя из этого применение топливных гранул становится наиболее целесообразным.

Подходит для реализации различных способов сжигания. Возможно применение традиционного слоевого, а также в котлах с кипящим слоем. В случае использования котлов с кипящим слоем за счет монофракционного состава пеллет решается основная проблема данного способа сжигания – механический недожог. В рамках магистерской диссертации на кафедре КиРС ведется разработка механизированных высокоэффективных котлов, работающих на пеллетах.

#### Список литературы:

1. Исследование сжигания сельскохозяйственных отходов. Журнал «Ползуновский вестник» / Е.В. Красуцкий, И.Д. Фурсов, Е.Б. Жуков, И.С. Якимова, Е.М. Пузырев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012.
2. Использование сельскохозяйственных и древесных отходов в энергетике / Жуков, Е.Б., Меняев К.В., Маришин Н.С. – Сборник научных трудов VII международной научной конференции молодых ученых. Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015.



## ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Супрун Н.Ю. - студент, Бородин Р.Г. –студент, Паутова Е.Е.- ассистент,  
Меняев К.В. – доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Эффективность энергетики непосредственно связана с развитием современных технологий для станций, работающих на угле. Извлекаемые запасы именно этого топлива составляют примерно 900 млрд. т, а так как мировой спрос на энергию с течением времени будет только увеличиваться, необходимо создавать высокотехнологичные установки, отличающиеся большой мощностью, высоким КПД, безопасной и надежной эксплуатацией, а также экологичностью. Этим параметрам в большей степени способны соответствовать прямоточные котлы, работающие на сверхкритическом давлении.

Целью работы является сбор и анализ основных сведений о прямоточном котле, в том числе при его работе на сверхкритических параметрах пара.

Задачей ставился анализ особенностей конструкторских решений, применяемых при проектировании таких котлов.

Прямоточные котлы сверхкритического давления являются основой развития мировой теплоэнергетики, поэтому актуальность работы не вызывает сомнений, так как данная технология весьма популярна и подлежит дальнейшей модернизации.

Прямоточные котлы устанавливаются главным образом на конденсационных электростанциях, где питание котлов осуществляется обессоленной водой. Применение котлов такого типа на теплоэлектроцентралях связано с повышенными затратами на химическую очистку воды.

Одно из самых распространенных и экологически безвредных веществ - вода, но перевести ее в сверхкритическое состояние достаточно трудно, поскольку параметры ее критической точки, когда нет разделения на воду и пар, а есть лишь некоторая рабочая среда, очень велики:  $t_{кр} = 374^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{кр} = 22,5 \text{ МПа}$ . При этом давлении вода в точке фазового перехода при нагреве непосредственно переходит в перегретый пар, минуя стадию кипения, и скрытая теплота парообразования при этом равна нулю.

Современные технологии позволяют создавать установки, отвечающие таким требованиям, но работать в этом диапазоне температур и давлений технически сложно. Сверхкритическая вода растворяет практически все органические соединения, которые не разлагаются при высоких температурах. Такая вода, при добавлении в нее кислорода, становится мощной окислительной средой, превращающей за несколько минут любые органические соединения в  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . Это вызывает коррозию деталей и отложение солей в трубопроводах, что в свою очередь создает опасность пережога труб. Единственным возможным типом парогенератора при сверхкритическом давлении является прямоточный котел.

Прямоточный котел характеризуется однократным прохождением рабочей средой всех поверхностей нагрева. На экономайзерном участке котла питательная вода не нагревается до температуры кипения примерно на  $30^{\circ}\text{C}$ , чтобы устранить образование пароводяной смеси и неравномерное ее распределение по параллельным трубкам экранов. Практически с тем же расходом вода проходит прямотоком одним ходом все поверхности, включая топочные экраны, полностью испаряется, перегревается в пароперегревателе и затем перегретый пар по паропроводу направляется к турбине. В такой конструкции котла в общем случае отсутствует четкое разделение экономайзерной, парообразующей и перегревательной поверхностей, отчего при переменных режимах работы изменяется положение границ между ними, что влияет на выходные параметры пара и, прежде всего, на температуру пара. Важнейшим условием надежной работы поверхностей нагрева котла такого типа является поддержание сверхкритических параметров среды в испарительной части котла, так как при докритическом давлении существует опасность расслоения среды на паровую и жидкую фазы, что может привести к пережогу поверхностей нагрева. Поддержание параметров пара должно обеспечиваться постоянным соотношением между

расходом топлива и расходом воды. Это вызвано тем, что с увеличением подачи топлива в топку при неизменном расходе питательной воды переходная зона смещается в область экранных поверхностей нагрева, что приводит к опасности пережога труб. С другой стороны, уменьшение подачи топлива, при постоянном расходе питательной воды, приводит к смещению переходной зоны в область пароперегревателя, что ведет к пережогу труб пароперегревателя и забросу воды в турбину. Аналогичная картина будет наблюдаться и в том случае, если увеличение расхода питательной воды осуществляется при неизменном расходе топлива. В связи с этим прямоточный котел требует применения более совершенной быстродействующей системы автоматического регулирования расходов топлива и воды.

Основными преимуществами прямоточных котлов по сравнению с котлами с естественной циркуляцией являются:

- возможность использования в экранах топочной камеры наклонно-опускного движения, так как рабочее тело принудительно приводится в движение питательным насосом, который увеличивает массовые скорости;
- способность обеспечивать большие паропроизводительность и параметры пара;
- отсутствие больших и тяжелых коллекторов;
- отсутствие высокотехнологичных барабановсопусными трубами;
- относительная свобода при компоновке поверхностей нагрева применительно к габаритам и форме котельного отделения;
- более высокие допускаемые тепловые нагрузки в топке и конвективных поверхностях нагрева за счет принудительного движения рабочего тела;
- более высокая степень использования поверхности нагрева, так как отсутствуют неомываемые газами (теневые) участки труб;
- повышенная маневренность из-за малой теплоаккумулирующей способности (малого объема воды и металлоконструкций) котла;
- малые массогабаритные показатели и высокий КПД;
- быстрая готовность к работе с укороченным временем нагрева. Это особенно важно там, где котёл используется как находящийся в резерве или как котёл для пиковых нагрузок.

К недостаткам прямоточных котлов относятся:

- отсутствие барабана вызывает удорожание стационарной водоподготовки, поскольку повышаются требования к чистоте питательной воды, которая должна в этом случае содержать примесей не больше, чем выдаваемый котлом пар, из-за выпадения и отложения солей в зоне ухудшенного теплообмена в условиях отсутствия продувания и внутрикотловой обработки воды.
- дополнительные затраты энергии питательным насосом на преодоление гидравлических сопротивлений в пароводяном тракте котла;
- очень сложная автоматизация котла, особенно в части поддержания заданных давления и температуры перегретого пара и обеспечения синхронного изменения расходов топлива, воздуха и питательной воды;
- неспособность котла выдавать одновременно насыщенный и перегретый пар;
- опасность закипания воды на входе в топочные экраны из-за закупорки паром отдельных труб при растопке котла из состояния горячего резерва;
- необходимость использования для растопки прямоточного котла специального растопочного сепаратора с системами и арматурой, что значительно усложняет установку;

Внедрение котлов на сверхкритических параметрах стало возможным благодаря разработкам в области технологии материалов, которые могут выдерживать условия таких высоких температур и давлений. Отрасли следует обратить внимание на развитие таких приоритетных направлений, как: системы автоматизированного управления, повышение надежности основных элементов котла, при помощи более высокотехнологичных материалов, повышение качества питательной воды.

Дальнейшее развитие отрасли в этих направлениях должно поспособствовать более широкому применению прямоточных котлов и обеспечению растущих потребностей населения в теплоэлектрической энергии.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВС НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

Брютов А.А. – аспирант, Сеначин П.К. – д.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Режимы глубокого дросселирования двигателя предполагают нетяговые режимы самостоятельного и принудительного холостого хода и близкие к ним режимы малых нагрузок. Изучение данных режимов работы двигателя является актуальным, т.к. общее время работы ДВС при городском цикле движения автомобиля составляет около 70% [1].

При постановке задачи численного моделирования динамики рабочего тела двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием в рамках многозонной модели возникают проблемы адекватного описания его геометрических и термодинамических характеристик различных зон. Прежде всего, зоны свежей смеси и зон продуктов сгорания, разделённых фронтом турбулизированного пламени.

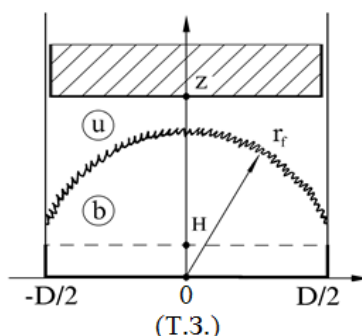
Если рассматривать только две зоны – свежей смеси и продуктов сгорания, то можно мысленно объединить все зоны свежей смеси в одну зону, а все зоны продуктов сгорания в другую зону. При таком подходе задача сводится к следующим альтернативным процедурам.

1. Заданию закона сгорания свежей смеси. Например, наиболее известной из эмпирических формул является закон сгорания И.И. Вибе [2].

$$\dot{x} = \frac{dx}{d\varphi} = -\ln(1-x^*) \frac{m+1}{\varphi_z} \left( \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_z} \right)^m (1-x) \quad (1)$$

или его модификация [3], которая заключается в последовательном применении формулы (1) два и более раз. Здесь  $\varphi_z = \varphi^* - \varphi_1$  – продолжительность процесса горения практически до полного выгорания заряда  $x^*$  порядка 0,999, то есть  $\ln(1-x^*) = -6,908$ ;  $m = const$  – эмпирическая величина, для которой накоплен огромный экспериментальный материал (по численным значениям  $\varphi_z$  и  $m$ ).

2. Заданию закона сгорания, опирающегося на реальную геометрию камеры сгорания [4].



$r_f$  – радиус сферического фронта пламени;  $z$  – координата поршня;  $D$  – диаметр поршня;  $H$  – высота камеры сгорания;  $0$  – точка, в которой происходит зажигание смеси;  $u$  – свежая смесь;  $b$  – продукты сгорания.

Рисунок 1 – Распространение фронта пламени в цилиндрической камере сгорания двигателя

Если считать, что фронт пламени распространяется в сферических сечениях камеры сгорания (рисунок 1) от точки зажигания, то при данном общем объеме  $V$  по известному текущему объёму продуктов сгорания  $V_b$  можно найти текущий радиус пламени  $r_f$ , то есть

$$r_f = f_1(V_b), \quad (2)$$

$$V_u = V - V_b, \quad (3)$$

а для объёма свежей смеси  $V_u$  справедливо отношение [4].

$$\frac{dV_u}{V_u} = \frac{dx}{1-x}, \quad (4)$$

поскольку за время  $dt$  на фронте пламени сгорает доля смеси  $dx$ , находящаяся в объёме

$$dV_u = F_f S_t dt, \quad (5)$$

где  $F_f$  – площадь поверхности ламинарного пламени (часть поверхности сферы);

$S_t \cong \sqrt{S_u^2 + u_t^2}$  – эффективная скорость турбулизованного пламени;  $u_t = k \cdot \bar{u}_p = k \cdot 4rn$  – скорость турбулентного переноса очагов пламени;  $k$  – коэффициент турбулизации.

Тогда из (4) и (5) уравнение массовой скорости горения может быть представлено в виде

$$\dot{x} = \frac{dx}{d\varphi} = \frac{1-x}{V_u} \cdot \frac{\langle F_f S_u \rangle}{2\pi n} = \frac{1-x}{V_u} \cdot \frac{\langle F_f S_t \rangle}{2\pi n}. \quad (6)$$

Далее по известному радиусу фронта пламени  $r_f$ , в сферических сечениях камеры сгорания и цилиндра имеем

$$F_f = f_2(r_f). \quad (7)$$

Остальные уравнения математической модели приведены в публикации [5].

Проанализируем процесс сгорания в ДВС на холостом ходу (х.х.) на примере специальной установки для изучения октановых числе топлив УИТ-85 (рисунок 2), условия работы которой приближены к работе реального транспортного ДВС.



Рисунок 2 – Установка УИТ-85[6]

На режимах глубокого дросселирования наблюдается высокая цикловая нестабильность процесса сгорания в последовательных рабочих циклах, которая определяется изменением степени инертности остаточных газов и химической активностью свежего заряда. На таких режимах коэффициент остаточных газов  $\gamma_r$  находится в районе 1, т.е. количество остаточных газов от прошлого цикла примерно равно количеству свежего заряда [1].

Проведём численное моделирование динамики рабочего процесса ДВС с помощью разработанной компьютерной программы[7].

На рисунках 3 и 4 представлены индикаторные диаграммы давления по углу поворота коленчатого вала (ПКВ), полученные для газового двигателя 1Ч 8,5/11,5 (УИТ-85). Газовое композитное топливо включает 95% природного газа (СПГ) и 5% водорода ( $H_2$ ).

Режим работы: степень сжатия  $\varepsilon = 7$ ; коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,029$ ; частота вращения  $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ , угол опережения зажигания (УОЗ)  $\varphi_1 = -13^\circ \text{ПКВ}$ . Начальные условия:  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 298 \text{ К}$ . Параметры на впуске:  $p_a = 95000 \text{ Па}$ ,  $T_a = 750 \text{ К}$  (температура в цилиндре на впуске  $T_a$  с учётом коэффициента остаточных газов  $\gamma_r \approx 0,7$  на х.х. и температуры воздушного заряда  $T_{a \text{ возд.}} = 325 \text{ К}$  становится равной порядка  $750 \text{ К}$ ).

При использовании закона сгорания И.И. Вибе (рисунок 3) наблюдается достаточно хорошее схождение с экспериментальными данными [8] при продолжительности горения  $\varphi_Z = \varphi_{Z \text{ эксп.}} = 36,5^\circ \text{ПКВ}$  в диапазоне между показателями характера горения  $m = 3 \dots 4$ . Однако, недостатком этой модели для расчёта характеристики тепловыделения является отсутствие связи между параметрами характеристики тепловыделения ( $m$ ,  $\varphi_Z$ ) с характеристиками распространения фронта пламени в условиях ДВС, особенно при работе на газовом или газовом композитном топливе.

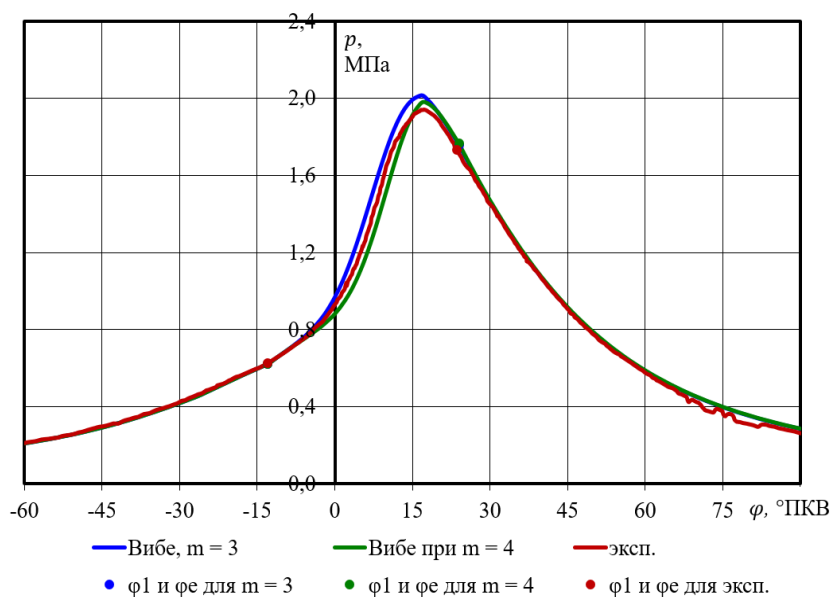


Рисунок 3 – Индикаторные диаграммы для установки УИТ-85: при использовании закона сгорания И.И. Вибе и экспериментальная

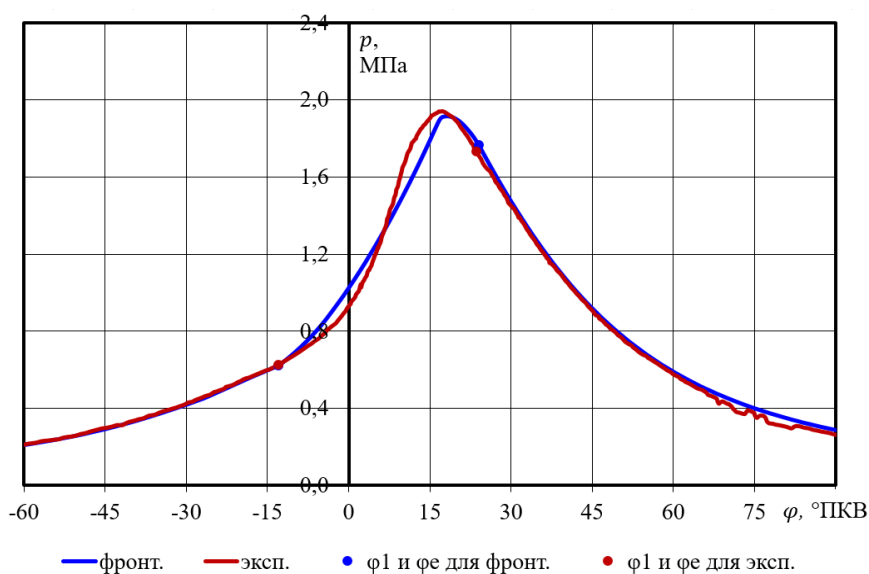


Рисунок 4– Индикаторные диаграммы для установки УИТ-85 при использовании закона фронтального горения и экспериментальная

При использовании закона фронтального горения для цилиндрической камеры сгорания (рисунок 4) происходит более плавное нарастание скорости тепловыделения. Показатель турбулизации пламени принят для продолжительности горения  $\varphi_{Z \text{ фронт.}} = \varphi_{Z \text{ эксп.}}$ .

Сравнение методов для описывания функции тепловыделения (рисунок 5) показывает, что абсолютное среднее отклонение давления  $\Delta p$  от эксперимента при использовании закона горения И.И. Вибе находится в диапазоне 0,003...0,021 МПа, а при использовании закона фронтального горения составляет 0,010 МПа.

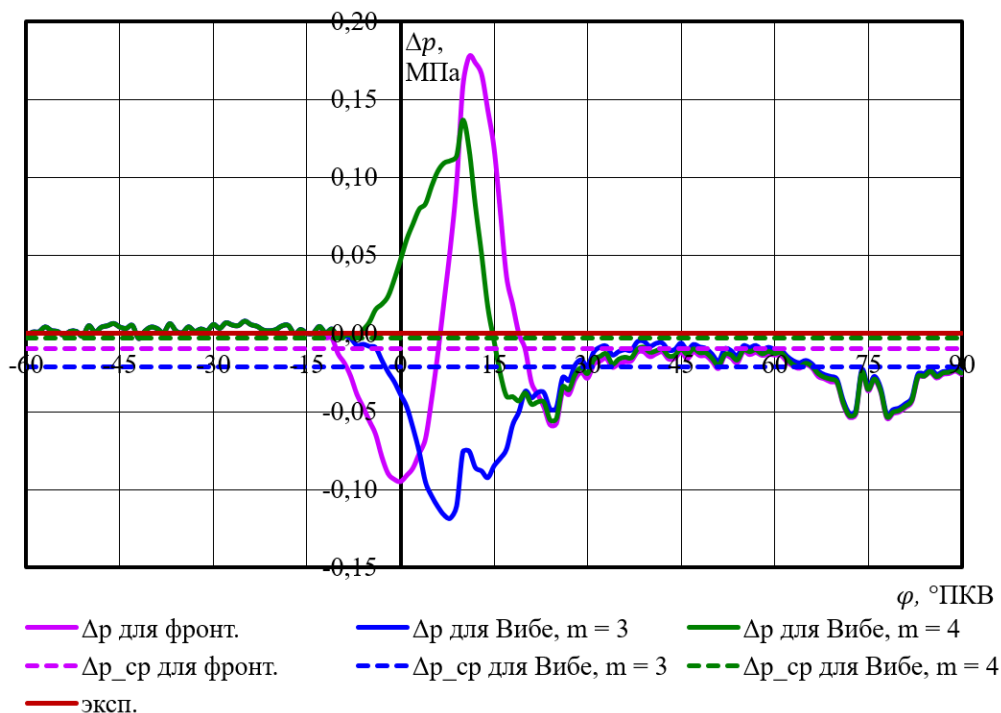


Рисунок 5 – Отклонение расчётного давления от эксперимента на индикаторных диаграммах для установки УИТ-85

Вывод. С точки зрения физики горения модель фронтального пламени более правильно описывает реальный процесс в двигателе. Однако, численное моделирование показывает, что эмпирический закон И.И. Вибе даёт лучшее согласие с экспериментом.

Задачей дальнейших исследований является уточнение модели фронтального горения в двигателе с целью достижения лучшего совпадения экспериментальными данными.

#### Список литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов и др. – М.: Машиностроение, 2013. – Т. IV-14: Двигатели внутреннего сгорания. – 784 с.
2. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. М.: Машгиз, 1962. – 270 с.
3. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
4. Матиевский, Д.Д. Новый подход к проблеме моделирования сгорания смеси в ДВС с искровым зажиганием / Д.Д. Матиевский, П.К. Сеначин, М.Ю. Свердлов, М.А. Ильина // Ползуновский альманах. – 1999. – № 2. – С. 101-110.
5. Брютов, А.А. Расчёт термодинамических процессов в цилиндре поршневых двигателей в рамках многозонного приближения / А.А. Брютов, П.К. Сеначин // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы II международной

заочной научно-практической конференции / НОЦ «МС». – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2014. – №2. – С. 110-111.

6. УИТ-85[Электронный ресурс]/Нефтепром. – Электронные данные. – 2016. – Режим доступа: <http://uit-85.ru>. – Установка типа УИТ-85.

7. Брютов, А.А. Моделирование рабочего процесса ДВС с учётом образования токсичных веществ в продуктах сгорания – Engine. Indication. Ecology (EIE) / А.А. Брютов, П.К. Сеначин // Свид-во о ГР программы для ЭВМ / Брютов Александр Андреевич, Сеначин Павел Кондратьевич (RU). – Заявка № 2014617070 от 22.07.2014. – Зарегистрировано в Реестре 01.10.2014.

8. Смоленская, Н.М. Улучшение экономических показателей двигателей с искровым зажиганием за счёт применения газовых композитных топлив: Дисс. канд. техн. наук: 05.04.02 / Смоленская Наталья Михайловна. – Тольятти, 2015. – 165 с.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ ДИЗЕЛЯ КАК МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ

Самарин А.В. - аспирант, Морозов Д.А. - студент, Горбанев С.В. - студент, Ульрих С.А. – к.т.н., доцент, Яковлев С.В. – к.т.н., Сеначин П.К. – д.т.н., профессор Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Для обеспечения эффективной организации рабочего процесса дизеля необходимо обеспечить согласование параметров топливно-воздушного факела с характеристиками камеры сгорания. Для дизелей, работающих с топливной аппаратурой высокого давления типа CommonRail, имеющиеся в настоящее время эмпирические формулы, описывающие динамику топливной струи, дают недостаточную точность или практически непригодны [1].

Для более точного расчёта динамики топливно-воздушного факела (топливной струи) дизеля необходимо разработать достаточно простую неэмпирическую **математическая модель**. В этой модели, основанной на динамике материальной точки переменной массы, предполагается раздельное описание факела до момента отрыва от сопла форсунки ( $t \leq \tau$ ) и после отрыва ( $t > \tau$ ). Геометрически факел представляется в виде усеченного конуса с неизменным углом раскрытия  $2\beta$ . Вершина конуса располагается внутри соплового канала на глубине (высоте внутреннего конуса)  $h = (d_0/2)/\text{tg}\beta$ , а начало координат – на оси факела на срезе сопла (Рисунок 1).

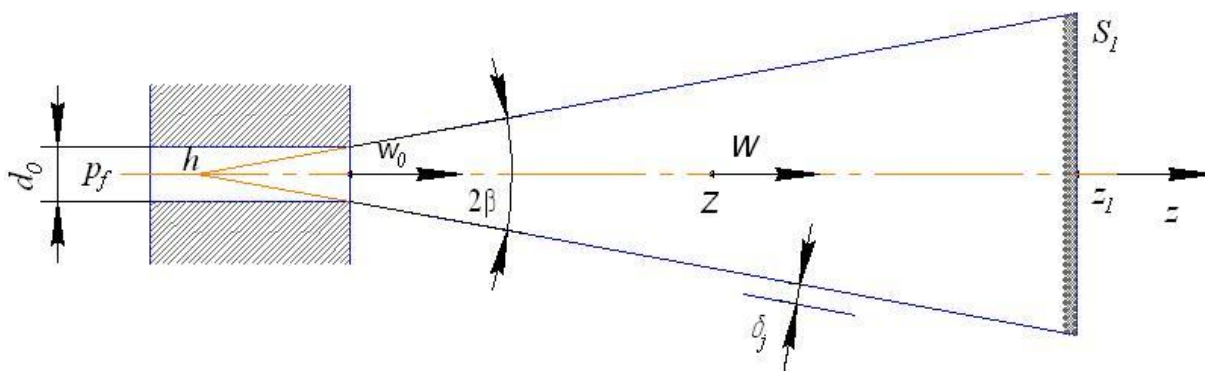


Рисунок 1 – Геометрическая модель топливной струи дизеля

Топливо-воздушный факел (топливная струя) дизеля представляется **изотермическим телом переменной массы**- материальной точкой с текущей координатой  $Z$  (находящейся на оси факела), движущейся с переменной скоростью  $W$  в результате импульса  $I_f$ , получаемого с впрыснутым форсункой топливом.

**Система уравнений динамики факеладо момента отрыва от сопла ( $t \leq \tau$ ) может быть получена следующим образом.**

Объем  $V_f$  и масса топлива  $m_f$  в факеле, а также текущий импульс системы  $I_f$  (без учета трения) в момент времени  $t$  равны

$$V_f = S_0 w_0 t, \quad (1)$$

$$m_f = \rho_f V_f = \rho_f S_0 w_0 t, \quad (2)$$

$$I_f = m_f w_0 = \rho_f S_0 w_0^2 t, \quad (3)$$

где  $S_0 = \pi d_0^2 / 4$  - сечение сопла;  $d_0$  - диаметр сопла;  $\rho_f$  - плотность жидкого топлива;  $w_0 = \sqrt{2(p_f - p) / \rho_f}$  - скорость топлива на выходе из сопла;  $p_f, p$  - давление топлива в сопле и наружное давление в камере сгорания.

Известно, что масса топлива распределяется по длине факела неравномерно, причем плотность распределения на фронте факела (при  $z = z_1$ ) максимальна. Пусть функция распределения топлива по длине факела имеет вид

$$\left( \frac{dm_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} = \rho_f S_0 \left[ 1 + (n+1) \left( \frac{z}{z_1} \right)^n \left( \frac{w_0 t}{z_1} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

где величина  $n$  заключена в пределах от 0,5 до 1,5. Функция (4) нормирована, поскольку

$$m_f = \int_0^{z_1} \left( \frac{dm_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} dz = \rho_f S_0 w_0 t,$$

что соответствует (2).

Координата центра масс факела  $Z$  определяется уравнением

$$m_\phi Z = m_f Z_f + m_{\text{air}} Z_{\text{air}}, \quad (5)$$

где  $Z_f, Z_{\text{air}}$  - координаты центра масс капель топлива и вовлеченного в движение воздуха соответственно. При этом очевидно, что масса факела  $m_\phi$  равна сумме масс топлива  $m_f$  и воздуха  $m_{\text{air}}$

$$m_\phi = m_f + m_{\text{air}}. \quad (6)$$

Координата центра масс топлива  $Z_f$  определяется из следующего интегрального соотношения

$$m_f Z_f = \int_0^{z_1} \left( \frac{dm_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} z dz,$$

тогда, с учетом (2) и (4), получим

$$Z_f = \frac{\rho_f S_0}{m_f} \int_0^{z_1} \left[ 1 + (n+1) \left( \frac{z}{z_1} \right)^n \left( \frac{w_0 t}{z_1} - 1 \right) \right] z dz = \frac{z_1}{n+2} \left( n+1 - \frac{n z_1}{2 w_0 t} \right). \quad (7)$$

Аналогичным образом найдем координату центра масс вовлеченного в движение воздуха  $Z_{\text{air}}$ . Объем  $V_{\text{air}}$  и масса  $m_{\text{air}}$  этого воздуха, с учетом (1), определяются из геометрических соотношений

$$V_{\text{air}} = V_\phi - V_f, \quad (8)$$



$$V_{\Phi} = \frac{S_0 h}{3} \left[ \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^3 - 1 \right] = S_0 z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right), \quad (9)$$

$$V_{\text{air}} = S_0 z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} - \frac{w_0 t}{z_1} \right), \quad (10)$$

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} V_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} - \frac{w_0 t}{z_1} \right), \quad (11)$$

где  $V_{\Phi}$  - геометрический объем факела;  $K_{\text{air}}$  - массовая доля вовлеченного в движение воздуха от всего воздуха в факеле.

Координата центра масс воздуха  $Z_{\text{air}}$  определяется из следующего интегрального соотношения

$$m_{\text{air}} Z_{\text{air}} = \int_0^{z_1} \left( \frac{dm_{\text{air}}}{dz} \right)_{t \leq \tau} z dz = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} \int_0^{z_1} \left[ \left( \frac{dV_{\Phi}}{dz} \right) - \left( \frac{dV_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} \right] z dz, \quad (12)$$

где производная  $(dV_{\Phi}/dz)$  может быть определена из (9), то есть

$$\left( \frac{dV_{\Phi}}{dz} \right) = S_0 \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2. \quad (13)$$

Согласно (4) имеем  $(dV_f/dz)_{t \leq \tau} = (dm_f/dz)_{t \leq \tau} / \rho_f$ . Тогда из (12), с учетом (13), получим

$$m_{\text{air}} Z_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 \int_0^{z_1} \left[ \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2 - \left( 1 + (n+1) \left( \frac{z}{z_1} \right)^n \left( \frac{w_0 t}{z_1} - 1 \right) \right) \right] z dz, \quad (14)$$

$$m_{\text{air}} Z_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 z_1^2 \left[ \frac{2z_1}{3h} + \frac{z_1^2}{4h^2} - \frac{n+1}{n+2} \left( \frac{w_0 t}{z_1} - 1 \right) \right].$$

Теперь из (5) и (6), с учетом (2), (7) и (11), можно записать формулу для координаты  $Z$  центра масс факела

$$Z = \frac{z_1 \left[ \frac{1}{2} + \frac{2z_1}{3h} + \frac{z_1^2}{4h^2} + (R_f - 1) \frac{n+1}{n+2} \left( \frac{w_0 t}{z_1} - \frac{n/2}{n+1} \right) \right]}{1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} + (R_f - 1) \frac{w_0 t}{z_1}}, \quad (15)$$

Полученное уравнение (15) для центра масс факела является трансцендентной функцией, из которой можно найти координату фронта  $z_1$  при известной координате  $Z$ . Решение возможно методами дихотомии, что не очень удобно с точки зрения численного моделирования, которое предполагает интегрирование системы дифференциальных уравнений процесса. Поэтому целесообразно (15) представить в форме производной вида

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad w_1 = f_{t \leq \tau}(Z, W, z_1, t).$$

С этой целью, дифференцируем уравнение (15) по времени, предварительно записав его в виде  $Z = A/B$ , то есть

$$WB = A' - ZB', \quad W = Z'.$$

В результате получим уравнение распространения струи (скорости фронта факела)

$$w_1 = \frac{W \left[ 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} + (R_f - 1) \frac{w_0 t}{z_1} \right] - w_0 (R_f - 1) \left( \frac{n+1}{n+2} - \frac{Z}{z_1} \right)}{\left( 1 - \frac{Z}{z_1} \right) \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 + (R_f - 1) \frac{n+1}{n+2} \left( \frac{w_0 t}{z_1} - \frac{n}{n+1} \right)}. \quad (16)$$

Здесь  $R_f = \rho_f / (K_{\text{air}} \rho_{\text{air}})$  - эффективное отношение плотностей.

Динамика факела как материальной точки переменной массы определяется производной текущего импульса, обусловленного, согласно (3), поступлением топлива из сопла форсунки

$$\frac{d}{dt} (m_\Phi W) = m_\Phi \frac{dW}{dt} + W \frac{dm_\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} (\rho_f S_0 w_0^2 t) = \rho_f S_0 w_0^2,$$

то есть имеем уравнение

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{m_\Phi} \left( \rho_f S_0 w_0^2 - W \frac{dm_\Phi}{dt} \right). \quad (17)$$

При этом полагается, что диссипация импульса отсутствует, поскольку топливно-воздушная струя считается затопленной.

С учетом (2), (6) и (11), из (17) получим уравнение динамики (скорости центра масс)

$$\frac{dW}{dt} = \frac{w_0 W \left[ 1 + R_f \left( \frac{w_0}{W} - 1 \right) - \frac{w_1}{w_0} \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 \right]}{(R_f - 1) w_0 t + z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right)}. \quad (18)$$

Таким образом, до момента окончания впрыска жидкого топлива форсункой ( $t \leq \tau$ ), математическая модель процесса развития факела (топливной струи дизеля), кроме (16) и (18), включает уравнения:

- координаты центра масс

$$\frac{dZ}{dt} = W, \quad (19)$$

- координаты фронта факела

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad (20)$$

**Система уравнений после момента отрыва от сопла ( $t > \tau$ ).**

Объем  $V_f$  и масса топлива  $m_f$  в факеле, а также импульс системы  $I_f$  (без учета трения) в момент времени  $t$  равны

$$V_f = S_0 w_0 \tau, \quad (21)$$

$$m_f = \rho_f V_f = \rho_f S_0 w_0 \tau, \quad (22)$$

$$I_f = m_f w_0 = \rho_f S_0 w_0^2 \tau = \text{const}, \quad (23)$$

где  $\tau$  - время впрыска топлива.

Текущий объем факела определяется его геометрией

$$\frac{V_\Phi}{S_0} = \frac{h}{3} \left[ \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^3 - \left( 1 + \frac{z_2}{h} \right)^3 \right] = z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right), \quad (24)$$

где  $z_1, z_2$  - координаты передней и задней границы факела.

Объем  $V_{\text{air}}$  и масса  $m_{\text{air}}$  воздуха в факеле, с учетом (21), определяются из

геометрических соотношений

$$V_{\text{air}} = V_{\Phi} - V_f = V_{\Phi} - S_0 w_0 \tau, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} m_{\text{air}} &= \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} V_{\text{air}} = \\ &= \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 \left[ z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) - w_0 \tau \right], \end{aligned} \quad (26)$$

Масса факела запишется как

$$\begin{aligned} m_{\Phi} &= m_f + m_{\text{air}} = \rho_f S_0 w_0 \tau + \\ &+ \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 \left[ z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) - w_0 \tau \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Примем на этом этапе следующую функцию распределения топлива по длине факела

$$\begin{aligned} \left( \frac{dm_f}{dz} \right)_{t>\tau} &= \rho_f S_0 \left[ 1 + (n+1) \left( \frac{z-z_2}{z_1-z_2} \right)^n \left( \frac{w_0 \tau}{z_1-z_2} - 1 \right) \right], \\ m_f &= \int_{z_2}^{z_1} \left( \frac{dm_f}{dz} \right)_{t>\tau} dz = \rho_f S_0 w_0 \tau, \end{aligned} \quad (28)$$

что соответствует (22).

Координата центра масс факела  $Z$ , по-прежнему, определяется уравнением (5).

Координата центра масс топлива  $Z_f$  определяется из следующего интегрального соотношения

$$m_f Z_f = \int_{z_2}^{z_1} \left( \frac{dm_f}{dz} \right)_{t>\tau} z dz,$$

тогда, с учетом (22) и (28), получим интеграл и его решение

$$\begin{aligned} Z_f &= \frac{\rho_f S_0}{m_f} \int_{z_2}^{z_1} \left[ 1 + (n+1) \left( \frac{z-z_2}{z_1-z_2} \right)^n \left( \frac{w_0 \tau}{z_1-z_2} - 1 \right) \right] z dz, \\ Z_f &= \frac{1}{w_0 \tau} \left[ \frac{z_1^2 - z_2^2}{2} + (w_0 \tau - z_1 + z_2) \left( \frac{n+1}{n+2} z_1 + \frac{1}{n+2} z_2 \right) \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

Координата центра масс воздуха  $Z_{\text{air}}$  определяется из следующего интегрального соотношения

$$m_{\text{air}} Z_{\text{air}} = \int_{z_2}^{z_1} \left( \frac{dm_{\text{air}}}{dz} \right)_{t>\tau} z dz = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} \int_{z_2}^{z_1} \left[ \left( \frac{dV_{\Phi}}{dz} \right) - \left( \frac{dV_f}{dz} \right)_{t>\tau} \right] z dz, \quad (30)$$

где производная  $(dV_{\Phi}/dz)$  может быть определена из (24), то есть

$$\left( \frac{dV_{\Phi}}{dz} \right) = S_0 \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2. \quad (31)$$

Согласно (28) имеем  $(dV_f/dz)_{t>\tau} = (dm_f/dz)_{t>\tau} / \rho_f$ . Тогда из (30), с учетом (31), получим

$$m_{\text{air}} Z_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 \int_{z_2}^{z_1} \left[ \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2 - \left( 1 + (n+1) \left( \frac{z-z_2}{z_1-z_2} \right)^n \left( \frac{w_0 \tau}{z_1-z_2} - 1 \right) \right) \right] z dz,$$

$$m_{\text{air}} Z_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 \left[ \begin{array}{l} \frac{2}{3h} (z_1^3 - z_2^3) + \frac{1}{4h^2} (z_1^4 - z_2^4) - \\ (w_0 \tau - z_1 + z_2) \left( \frac{n+1}{n+2} z_1 + \frac{1}{n+2} z_2 \right) \end{array} \right]. \quad (32)$$

На основании уравнения (5) и формул (22), (29), (32) и (27) получим формулу для координаты  $Z$  центра масс факела

$$Z = \frac{\left[ z_1^2 \left( \frac{R_f}{2} + \frac{2z_1}{3h} + \frac{z_1^2}{4h^2} \right) - z_2^2 \left( \frac{R_f}{2} + \frac{2z_2}{3h} + \frac{z_2^2}{4h^2} \right) + \right. \\ \left. (R_f - 1) \left[ w_0 \tau \frac{nz_1 + z_1 + z_2}{n+2} - \frac{n}{n+2} \cdot \frac{(z_1 - z_2)^2}{2} \right] \right]}{z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) + (R_f - 1) w_0 \tau}. \quad (33)$$

Трансцендентную функцию (33) целесообразно представить в форме производной вида

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad w_1 = f_{t \leq \tau}(Z, W, w_2, z_1, z_2, t).$$

С этой целью, дифференцируем уравнение (33) по времени, предварительно записав его в виде  $Z = A/B$ , то есть

$$WB = A' - ZB', \quad W = Z', \quad w_2 = z_2'.$$

В результате получим уравнение распространения струи (*скорости фронта факела*)

$$w_1 = \frac{\left\{ \begin{array}{l} W \left[ z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) + (R_f - 1) w_0 \tau \right] - \\ w_2 \left[ (Z - z_2) \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 + (R_f - 1) \frac{w_0 \tau + n(z_1 - z_2)}{n+2} \right] \end{array} \right\}}{(z_1 - Z) \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 + (R_f - 1) \frac{(n+1)w_0 \tau - n(z_1 - z_2)}{n+2}}. \quad (34)$$

Динамика факела как материальной точки переменной массы определяется производной текущего импульса

$$\frac{d}{dt} (m_{\Phi} W) = m_{\Phi} \frac{dW}{dt} + W \frac{dm_{\Phi}}{dt} = \frac{d}{dt} (\rho_f S_0 w_0^2 \tau) = 0,$$

то есть имеем уравнение

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{m_{\Phi}} \left( -W \frac{dm_{\Phi}}{dt} \right). \quad (35)$$

При этом диссипация импульса отсутствует (струя затопленная).

Из уравнения (27) для производной массы факела имеем

$$\frac{dm_{\Phi}}{dt} = \rho_{\text{air}} K_{\text{air}} S_0 \left[ w_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 - w_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} \right)^2 \right]. \quad (36)$$

С учетом (27) и (36), из (35) получим уравнение динамики (*ускорения центра масс*)

$$\frac{dW}{dt} = \frac{W \left[ w_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} \right)^2 - w_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 \right]}{(R_f - 1)w_0\tau + z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right)}. \quad (37)$$

Таким образом, после момента окончания впрыска жидкого топлива форсункой ( $t > \tau$ ), математическая модель процесса развития факела (топливной струи дизеля), кроме (34) и (37), включает уравнения:

– *координаты центра масс*

$$\frac{dZ}{dt} = W, \quad (38)$$

– *координаты фронта факела*

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad (39)$$

– *координаты задней границы факела*

$$\frac{dz_2}{dt} = w_2, \quad (40)$$

– *скорости задней границы факела*

$$w_2 = W \left[ 1 + \left( \frac{w_0}{W} - 1 \right) \frac{\tau}{t} \right]. \quad (41)$$

Предложенная математическая модель топливно-воздушной струи дизеля, описываемая уравнениями (16), (18)-(20), до момента окончания впрыска жидкого топлива форсункой ( $t \leq \tau$ ) и, описываемая уравнениями (34), (37)-(41), после момента окончания впрыска ( $t > \tau$ ), решается численно путем интегрирования известными методами, например методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Данная математическая модель топливно-воздушной струи дизеля предназначена для численного моделирования динамики дизельного факела до момента воспламенения топлива (в течение периода индукции) и является существенным уточнением ранее предложенной модели [2-4]. Эта математическая модель топливно-воздушного факела (топливной струи) дизеля может быть использована для моделирования рабочего процесса двигателя с топливной аппаратурой высокого давления типа CommonRail.

#### Список литературы:

1. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. / Р.З. Кавтарадзе.- М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.- 720 с.
2. Сеначин, П.К. Моделирование геометрических и динамических параметров топливной струи при впрыске в камеру сгорания дизеля на основе эксперимента в бомбе / П.К. Сеначин, С.А. Ульрих, В.В. Чертищев // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 12(115). Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки. Вып. 5. – ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 64-67.
3. Якименко, П.А. Моделирование параметров топливно-воздушной струи дизеля / П.А. Якименко, С.А. Ульрих, П.К. Сеначин // Горизонты образования: электронный научно-образовательный журнал АлтГТУ / 11-я Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и молодежь-2014». – Барнаул, 2014.– С. 43-47. - Режим доступа: [http://edu.secna.ru/media/f/transport\\_sistem\\_tez\\_2014.pdf](http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2014.pdf).
4. Якименко, П.А. Совершенствование рабочего процесса дизеля с топливной аппаратурой COMMONRAIL оптимизацией топливной струи / П.А. Якименко, С.А. Ульрих, П.К. Сеначин // Горизонты образования: электронный научно-образовательный журнал АлтГТУ / 12-я Всероссийская научно-техническая конференция ... «Наука и молодежь-

## РЕЗУЛЬТАТЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ

Некрасова М.А. - студент, Свистула А.Е. - д.т.н., профессор, Матиевский Г.Д. - к.т.н., доцент Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Важной научно-технической проблемой современного двигателестроения является обеспечение постоянно ужесточающихся норм по расходу топлива и вредных выбросов отработавших газов (ОВ). Она решается комплексом разноплановых мероприятий, в том числе и выполнением ряда специфичных, связанных с особенностями работы потребителя. Так в дизель-генераторах с всережимным генератором и преобразователем частоты, используемых в энергетических комплексах на базе гибридных энергоустановок, предпочтительна работа дизеля по оптимизационной характеристике, обеспечивающей наименьший расход топлива на заданной мощности. Для дизелей промышленного и сельскохозяйственного назначения необходимо иметь значение коэффициента приспособляемости порядка 1,4, что дает преимущества в тягово-экономических показателях и разгонных качествах машино-тракторного агрегата.

В данной работе проводится анализ изменения эффективного расхода топлива и коэффициента приспособляемости по совокупности ХПМ, ограничиваемых перегрузочной ветвью ВСХ, а также индикаторного и эффективного КПД, предлагается классификация ХПМ, разрабатывается методика отыскания оптимизационной зависимости  $n_{opt} = f(N_{econst})$ , и осуществляется построение ХПМ.

По влиянию на величину коэффициента приспособляемости  $K_p$ , характер изменения  $\eta_e = f(n)$ , величину максимума КПД  $\eta_e$ , выбор оптимизационной функции  $n_{opt} = f(N_{econst})$  выделены две зоны ХПМ с мощностью большей и меньшей  $N_{econst} = (0,75 \div 0,80) N_{eном}$ . Разделяющая их ХПМ с  $N_{econst} = (0,75 \div 0,80) N_{eном}$  отличается пологостью  $g_e = f(n)$ , высокими значениями КПД  $\eta_e$  и достижением коэффициента  $K_p = 1,4$  только корректировкой топливоподачи. В зоне высоких мощностей  $N_{econst} \geq (0,75 \div 0,80) N_{eном}$  целесообразна работа двигателя по ХПМ, в зоне малых мощностей – работа на скоростном режиме  $n_{opt}$  наилучшей экономичности.

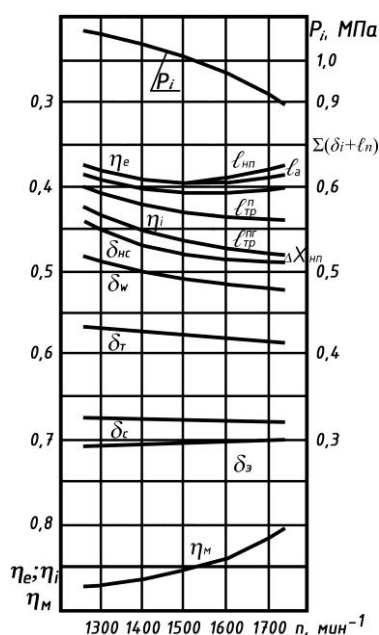


Рисунок 1 – Анализ эффективного КПД дизеля 4Ч13/14 по ХПМ

Анализом КПД по статьям неиспользования теплоты в цикле и затратам работы на преодоление механических потерь по ХПМ дизеля 4ЧН 13/14 в зоне мощностей  $N_{econst} \geq 0,80 N_{eнюм}$ , представленными на рисунке 1, выявлены наибольшие потенциальные возможности повышения КПД уменьшением коэффициентов несвоевременности сгорания  $\delta_{нс}$ , изменения показателя адиабаты  $\delta_k = \delta_1 \delta_c$ , отвода теплоты теплообменом  $\delta_w$  и насосных потерь  $l_{нп}$ .

Из конкретных мероприятий – это оптимизация параметров впрыска топлива, охлаждение надувочного воздуха, динамический наддув и др.

Разработка методики определения оптимизационной зависимости  $n_{онм} = f(N_{econst})$  и потенциального эффекта в снижении расхода топлива основана на учете значения мощности  $N_{econst}$  и принятого условия построения ВСХ. Если условие - получение  $N_{emax}$  для каждой частоты  $n$ , то в диапазоне  $N_{econst} \geq (1,0 \div 0,70) N_{eнюм}$  – это нагрузочная характеристика с  $n = n_n = const$ , для мощностей менее  $0,7 N_{eнюм}$  – это настроенная переменная частота  $n_{онм}$ . Если условие - максимальная экономичность, то оптимизационная характеристика есть ВСХ. Если комбинация условий (сначала по экономичности, затем по мощности), то при  $N_{econst} \geq (1,0 \div 0,70) N_{eнюм}$  – это ВСХ, при меньшей мощности - настройка оптимальной частоты. Настройка сводится к расчету частоты, для которой нагрузка двигателя по заданному значению  $N_{econst}$  будет составлять  $K_3 = 70 \div 80$  % от развиваемой мощности на ВСХ по выражению

$$\frac{1}{K_3} = \frac{N_{eнюм}}{N_{econst}} \left[ \beta \left( \frac{n}{n_n} \right)_{онм} + \delta \left( \frac{n}{n_n} \right)_{онм}^2 - \left( \frac{n}{n_n} \right)_{онм}^3 \right], \quad (1)$$

где  $\beta$  и  $\delta$  коэффициенты в аппроксимационной зависимости мощности от частоты для ВСХ.

Для дизеля 4ЧН 13/14 выполнено построение ХПМ с уровнями мощности номинальным и 0,8  $N_{eнюм}$  по методике, основанной на использовании функциональных зависимостей индикаторного КПД  $\eta_i$  и среднего давления механических потерь от коэффициента избытка воздуха (для  $\eta_i$ ), эффективного давления и частоты вращения вала. Полученные зависимости (рисунок 2) устанавливают изменения основных факторов обеспечения работы дизеля по ХПМ: часового расхода топлива  $G_m$  и давления наддува  $P_k$ . Для обоих вариантов расчета достаточно полагая зависимость  $g_e = f(n)$  допускает возможность управления подачей топлива по ХПМ из условия постоянства часового расхода топлива.

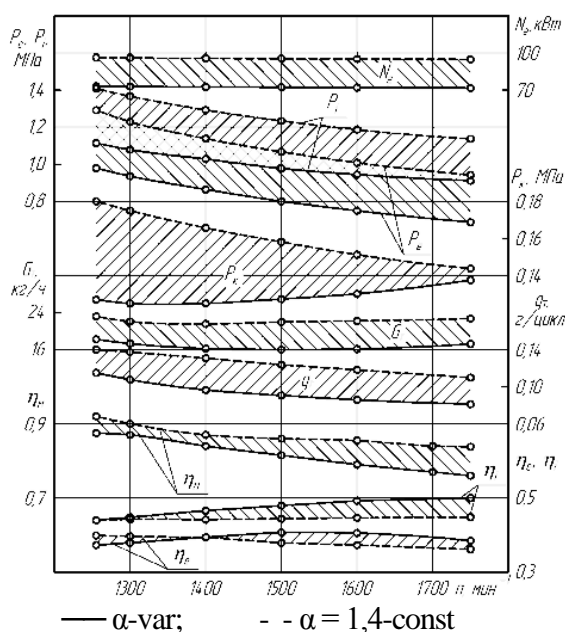


Рисунок 2 – Расчётная внешняя скоростная характеристика ДПМ 4ЧН13/14

В варианте  $N_{еюм}$  необходимо обеспечить увеличение давления наддува порядка 20 % от значения  $P_k$  в номинальном режиме.

В результате проведенных исследований:

1. Предложена классификация ХПМ по значению мощности как основного фактора, определяющего величину коэффициента приспособляемости  $K_p$ , вид зависимости  $\eta_e = f(n)$  и величину КПД  $\eta_e$ , выбор оптимизационной частоты  $n_{opt} = f(N_{econst})$ . Выделены две зоны ХПМ, разделяемые ХПМ с  $N_{econst} = (0,75 \div 0,80) N_{еюм}$ , отличающейся пологостью  $\eta_e = f(n)$ , высокими значениями КПД  $\eta_e$  и величиной коэффициента  $K_p = 1,4$ . Ее можно реализовать в двигателях с двумя уровнями мощности корректировкой топливоподачи.

2. Разработанная методика поиска оптимальной частоты наряду с методиками анализа индикаторного и эффективного КПД и построения ХПМ представляют методический комплекс для исследования ХПМ. Применение комплекса к исследованию дизелей ОАО «АМЗ» позволило:

- выявить возможность повышения КПД мероприятиями, уменьшающими неиспользование теплоты от несвоевременности сгорания, теплообмена и уменьшения показателя адиабаты и снижающими насосные потери;
- определить алгоритм управления цикловой подачей топлива (из условия постоянства часового расхода топлива) и давлением наддува.

#### Список литературы:

1. Матиевский Г.Д. Двойная подача топлива в дизеле с топливной системой непосредственного действия разделённого типа /А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский //Ползуновский Вестник. – 2009.- №4. - С. 166-173.

2. Матиевский Г.Д. Анализ показателей работы дизеля по характеристике постоянной мощности /Г.Д. Матиевский, С.П. Кулманаков.- Ползуновский вестник. - 2010. - № 1.- С. 13-20.

3. Матиевский Г.Д. Исследование внешней скоростной характеристики дизеля для анализа показателей работы на режимах постоянной мощности /Г.Д.Матиевский, А.Н. Любимов //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - № 2. – 2011. – С. 260-267.

4. Матиевский Г.Д. Выбор и исследование нейтрализатора отработавших газов на эффективность очистки для дизеля, работающего на режимах постоянной мощности с системой топливоподачи CR /В.А. Сеницын,С.П. Кулманаков, Г.Д. Матиевский //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. - № 2. – С. 42-48.

5. Матиевский Г.Д. /Улучшение рабочего процесса дизеля при двойной подаче топлива /Г.Д. Матиевский, А.Е. Свистула // Грузовик. – 2011. - № 5. - С.35-38. [режим доступа <http://www.mashin.Ru/zhurnalap/?id=58360&idar=1062661>].

6. Матиевский Г.Д. Повышение экономичности и снижение вредных выбросов дизеля на режимах постоянной мощности / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский // Ползуновский Вестник. – 2012. - №3/1. - С.113-117.

7. Матиевский Г.Д. Оптимизация скоростного режима дизеля по характеристике постоянной мощности / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский, М.Э. Брякотин // Известия МААО. – СПб. - Вып. №16. – Т. 4. - 2013. - С. 225–230.

8. Матиевский Г.Д. Построение характеристики постоянной мощности дизеля / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский, М.Э. Брякотин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. - № 12 (115). – Вып. 5. – С. 51-54.

9. Матиевский Г.Д. Повышение эффективности работы двигателя на режимах и характеристиках постоянной мощности / Г.Д. Матиевский, С.П. Кулманаков //Сборник научных трудов Международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана // Под ред. Н.А. Иващенко, В.А. Вагнера, Л.В. Грехова. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - С.191-194.



10. Матиевский Г.Д. Улучшение рабочего процесса дизеля при двойной подаче топлива / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский // Сборник научных трудов международной конференции «Двигатель 2010», посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана / под ред. Н.А.Ивашенко, В.А.Вагнера, Л.В.Грехова – М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2010. - С. 224-226.
11. Матиевский Г.Д. Оптимизация скоростного режима работы дизеля / Г.Д. Матиевский // Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта: тезисы и доклады 69-й науч. техн. конф. студентов, аспирантов и проф.-преп. состава технического ун-та. Часть 1 // Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. С. 74-75.
12. Матиевский Г.Д. Оптимизация скоростного режима дизеля по характеристике постоянной мощности / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский, М.Э. Брякотин // 6-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тезисы докладов научн.-практ. конф. – М: МАДИ, 2013. – С. 34-35.
13. Матиевский Г.Д. Снижение вредных выбросов и расхода топлива дизеля на режимах эксплуатации / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский, М.Э. Брякотин // Состояние и перспективы развития социально-культурного и технического сервиса: матер. I Всероссийской научн.-практ. конф. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – С. 216-219.

## РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ТИПА «COMMONRAIL» С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЕЙ

Терещенко И.С. – аспирант, Кулмананов С.П. – к.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Современная топливная аппаратура аккумуляторного типа обеспечивает высокие давления впрыскивания для выполнения дизельными двигателями строгих норм по содержанию вредных веществ в отработавших газах.

Современные требования по токсичности настолько высоки, что для их достижений требуется повышение давления впрыскивания до 200 (в перспективе до 220) МПа, и управляемый закон впрыска. Такую характеристику впрыскивания невозможно обеспечить без создания электрогидроуправляемой форсунки нового поколения.

Создание новой форсунки требует очень много времени и денежных инвестиций (из-за тонкой настройки форсунки), а также тормозится недостаточностью опыта и достоверных математических моделей. Создание и использование уточненной модели с описанием механических, гидравлических, электрических и магнитных процессов позволит сократить время для создания форсунки нового поколения, а также является единственным средством поиска оптимумов при противоречивом действии на поведение ТПА различных связанных параметров.

Целью работы является разработка быстродействующей форсунки для топливной аппаратуры аккумуляторного типа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель гидравлически разгруженного электромагнитного клапана с уменьшенной массой подвижных частей и уменьшенным расходом топлива на управление;
- выполнить профилирование топливоподводящих каналов для обеспечения минимальных гидравлических потерь;

- разработать быстродействующий электромагнит с оптимальными: количеством витков катушки, профилем провода катушки для обеспечения максимально возможного тягового усилия, при минимальных размерах электромагнита.

В результате проведенных исследований были разработаны следующие компоненты форсунки топливоподающей системы аккумуляторного типа:

- электромагнитный клапан разгруженного типа, с уменьшенной массой подвижных частей;

- электромагнит с минимальными габаритными размерами.

По результатам выполненных исследований были спроектированы и изготовлены новые конструкции электрогидроуправляемых форсунок и проведены их испытания. По результатам проведенных испытаний были получены расходные характеристики форсунок, а также проведена оценка быстродействия и гидравлических характеристик внутренних каналов.

По результатам проведенных испытаний сделаны следующие выводы:

- продолжительность переходных процессов (открытия и закрытия управляющего клапана) сократилось на 20%;

- потери давления (уменьшение гидравлического сопротивления) позволили увеличить давление в поддыгольном объеме и уменьшить объем топлива, идущего на слив через клапан управления.

#### Список литературы:

1. Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В., Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей: Учебное пособие. - М: «Легион-Автодата», 2013. - 292 с.
2. Грехов Л.В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа CommonRail. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 64 с.
3. Грехов Л.В., Кулешов А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 64 с.
4. Грехов Л.В. Топливная аппаратура с электронным управлением дизелей и двигателей с непосредственным впрыском бензина. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2001. 176 с.

## РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛОТОКСИЧНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Терещенко И.С. – аспирант, Кулмананов С.П. – к.т.н., профессор

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В связи с постоянным ужесточением норм выбросов вредных веществ в окружающую среду двигателями внутреннего сгорания, современным исследователям и конструкторам ДВС необходимо решать задачи по обеспечению данных требований при создании перспективных дизельных двигателей. Среди основных направлений совершенствования дизелей является разработка перспективной топливоподающей аппаратуры (далее ТПА).

К современным дизельным двигателям предъявляются все более жесткие требования по экологии, расходу топлива и мощностным показателям. Существующие двигатели с традиционной топливной аппаратурой не могут обеспечить современные требования. Данные требования возможно обеспечить при использовании перспективной системы аккумуляторного типа «CommonRail», которая способна обеспечивать: гибкое изменение характеристики впрыскивания (в зависимости от режима работы двигателя), высокие давления впрыскивания, минимальный размер капель топлива, возможность формирования многофазного впрыскивания, обеспечение оптимального угла опережения впрыскивания в зависимости от режима работы и т.д. Все это способствует обеспечению низких

показателей выбросов вредных веществ в атмосферу, уровня шума и лучшую топливную экономичность (по сравнению с традиционной ТПА).

В настоящее время АЗПИ (Алтайский завод прецизионных изделий) является единственным в России предприятием, выпускающим топливную систему данного типа.

При создании аккумуляторных топливных систем (CommonRail) возникают следующие проблемы, требующие решения:

- отработка электрогидравлической форсунки с высокими техническими, но минимальными стоимостными и габаритными показателями, а также обладающей хорошей технологичностью;

- создание электроуправляемого клапана форсунки и его электропривода: гидравлически уравновешенного, экономичного по расходу топлива, технологичного и стабильного в эксплуатации;

- создание простого, дешевого, надежного ТНВД на давления 200 МПа и выше;

- эффективный метод управления характеристикой впрыскивания;

- эффективная, недорогая, многофункциональная САУ (система автоматического управления) и программное обеспечение управлением двигателем.

АЗПИ, совместно с кафедрой ДВС АлтГТУ, проводят исследования по данным проблемам. Проведенные расчетные и экспериментальные работы позволили решить ряд проблем и обеспечить высокие технические показатели выпускаемой топливной аппаратуры.

#### Список литературы:

1. Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В., Конструкция, расчет и технический сервис топливopодающих систем дизелей: Учебное пособие. - М.: «Легион-Автодата», 2013. - 292с.
2. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. - М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. - 480 с.
3. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Аккумуляторная\\_топливная\\_система](https://ru.wikipedia.org/wiki/Аккумуляторная_топливная_система)
4. Марков, В.А. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.И. Мальчук. – М.: Изд-во МГТУ, 2007. – 360 с.

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПОУВЕЛИЧЕНИЮ РЕСУРСА ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРОУПРАВЛЯЕМОЙ ФОРСУНКИ «COMMONRAIL»

Бобров С.П. – аспирант, Кулманаков С.П. – к.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

С целью выполнения все более жестких экологических норм по содержанию вредных веществ в отработавших газах дизельного двигателя, производители активно используют топливную аппаратуру аккумуляторного типа «CommonRail».

Для достижения требований по токсичности без дополнительной установки на двигатель дорогостоящих вспомогательных компонентов системы выпуска отработавших газов, таких как каталитический нейтрализатор и система впрыска мочевины, требуется повышение давления впрыскивания топлива в цилиндр до 180 МПа и более. При работе на таком высоком аккумуляторном давлении топлива возникает острый вопрос обеспечения необходимого ресурса компонентов топливной аппаратуры, в частности электрогидроуправляемой форсунки.

Прецизионные детали форсунки являются наиболее ответственными и наименее долговечными элементами инжектора, по причине воздействия на них очень высоких

гидравлических нагрузок, возникающих во время процесса впрыска топлива. Причины отказов и повреждений кроются в недостаточном уровне проектирования и конструирования, в ходе которых не всегда используются достижения науки, ограниченно применяются современные материалы и упрочняющие технологии.

Целью работы является разработка конструктивных мероприятий по увеличению ресурса дизельной электрогидроуправляемой форсунки «CommonRail».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать гидравлические процессы, протекающие в форсунке;
- исследовать протекание кавитационных процессов в форсунке, обнаружить зоны возникновения кавитации, определить фактические значения давления топлива в кавитационных зонах;
- разработать конструктивные мероприятия по отведению зон кавитации от запирающих элементов деталей форсунки.

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

- выявлены зоны возникновения кавитации в управляющих элементах форсунки при процессе впрыскивания топлива;
- разработана экспериментальная установка для определения значения давления топлива в выявленных кавитационных зонах;
- разработан ряд мероприятий по изменению конструкции испытываемой форсунки для снижения или полного исключения воздействия кавитации.

По результатам выполненных исследований была разработана и изготовлена конструкция управляющего клапана форсунки, с конструктивно отведенной зоной образования кавитации от запирающих элементов, и проведены испытания.

По результатам проведенных испытаний сделаны следующие выводы:

- кавитационное разрушение запорных кромок управляющего клапана форсунки при давлении впрыска топлива 180 МПа прекратилось.

#### Список литературы:

1. Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В., Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей: Учебное пособие. - М: «Легион-Автодата», 2013. - 292 с.
2. Иващенко Н.А., Вагнер В.А., Грехов Л.В. Расчет процесса подачи и проектирование топливной аппаратуры дизелей. - Барнаул-М.: Изд-во АлтГТУ им. И.И.Ползунова, 2002. - 166 с., ил.

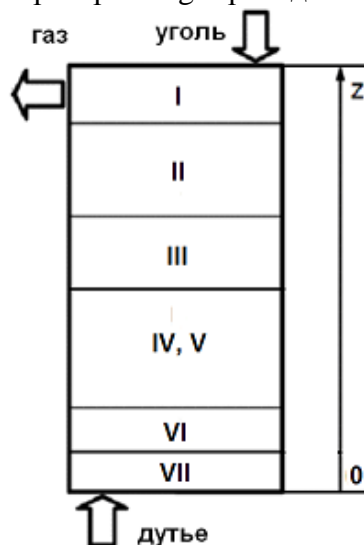
#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОГО ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В ПЛОТНОМ СЛОЕ РЕАКТОРА LURGI

Таймасов Д.Р. - студент, Маришин Н.С. - студент, Сеначин П.К. – д.т.н., профессор Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В настоящее время наблюдается рост интереса к глубокой переработке угля и, в частности, к газификации в плотном слое в газогенераторах различных типов (традиционно это газогенераторы, работающие по схеме Lurgi), однако отсутствие современной нормативной методики для инженерных расчётов физико-химических процессов в таких устройствах отчасти затрудняет их широкое внедрение. Кроме того, в настоящее время предложены более современные технологии слоевой газификации, для которых также отсутствуют нормативные методики [1]. Существует несколько стационарных одномерных моделей адиабатических и неадиабатических реакторов, в том числе представленных в работах [1-6].

В данной работе нами рассматривается математическая модель физико-химических процессов, протекающих в основных зонах газогенератора плотного слоя прямого процесса типа Lurgi, опирающаяся на представления, развитые в работах [7-9].

Конструктивная схема газогенератора Lurgi приведена на рисунке 1.



I – газовое пространство; II – зона сушки; III – зона выхода летучих; IV, V- восстановительные зоны; VI – окислительная зона; VII- зольная подушка.

Рисунок 1 - Принципиальная схема газогенератора Lurgi и его реакционных зон

Рассмотрим процессы, протекающие в кислородной и восстановительной зонах. Пусть имеется прямоточный реактор цилиндрической формы радиусом  $r$ , работающий под давлением  $p$ , в котором протекает процесс горения и газификации угольного слоя достаточно большой толщины. Твердая фаза (уголь фракции 5,0-30,0 мм) подается сверху со скоростью  $\vec{u}^*$  относительно стенок реактора газификатора. Движение твердой фазы происходит под действием гравитационной силы.

Эта твердая фаза (а точнее, кокс угля) в стационарном режиме работы газогенератора поступает во фронт пламени со скоростью горения  $\vec{w}_f$ . Парокислородное или паровоздушное дутье (первичный и вторичный пар и 95 % технический кислород или воздух) поступает снизу через колосниковую решетку и зольную подушку VII (Рисунок 1) с относительной скоростью фильтрации  $\vec{w}_\phi$ . При этом пространственная (видимая) скорость фронта пламени  $\vec{u}_f$  и скорость движения газовой фазы  $\vec{u}$  относительно стенок реактора газификатора могут быть представлены в виде суммы, в векторном или скалярном виде, как

$$\vec{u}_f = \vec{w}_f + \vec{u}^* \text{ (или } u_f = w_f - u^* \text{),}$$

$$\vec{u} = \vec{w}_\phi + \vec{u}^* \text{ (или } u = w_\phi - u^* \text{).}$$

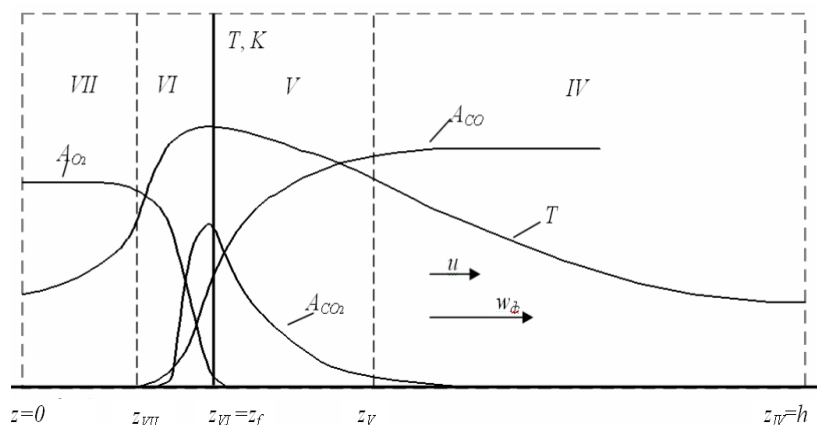
В качестве дутьевой смеси (на выходе из реактора) в газогенератор подается смесь воздуха и пара (или смесь кислорода и пара).

На рисунке 2 изображена активная часть реактора Lurgi, структура течения сред и профили давления и температуры по высоте шахты газификатора. Здесь за начало отсчета координаты  $z$  принята плоскость начала зольной подушки – выхода из реактора (входа дутьевых газов в реактор).

Ограничиваясь в дальнейшем учетом лишь основных факторов, будем рассматривать процессы в шахте реактора в приближении постоянства теплового эффекта реакции,

коэффициентов переноса, удельной теплоемкости фаз и пористой среды. Не будем учитывать эффекты спекания и деформации твердых фаз, а также плавление фаз в процессе химического превращения.

В модели описывается квазистационарный режим газификации топлива, переходные режимы не рассматриваются. В этом режиме фронт пламени покоится  $u_f = 0$ , поэтому скорость горения  $w_f$  в точности равна скорости поступления твердой фазы  $u^*$ . Плотность фаз, в том числе газовой фазы  $\rho_g = \sum_s \rho_s$ , относится ко всему объему пористой среды.



$z_f = z_{VI}$  - координата фронта пламени;  $h$  - высота активной части реактора, приведенной на рисунке.

Рисунок 2 - Структура волны горения и профили концентраций компонентов газовой фазы и температуры слоя по высоте реактора газификатора Лурги

### Блок химических уравнений макрокинетики

Для определенности полагаем, что тепловой эффект всех нижеприведенных химических реакций относится к газовой фазе (это справедливо, поскольку газовая и твердая фазы находятся в термодинамическом равновесии).

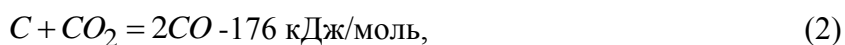
В кислородной зоне **VI** протекают три основные макрокинетические реакции, которые для удобства пометим индексами 1, 2 и 3 соответственно:

- первичная экзотермическая реакция окисления углерода



и протекающие одновременно с ней вторичные реакции, а именно,

- эндотермическое восстановление двуокиси углерода на поверхности твердой фазы (реакция газификации)

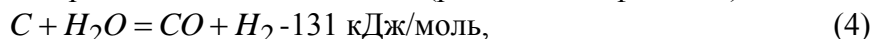


-газофазную реакцию горения окиси углерода

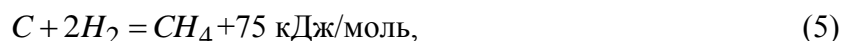


В восстановительных зонах **V** и **IV** протекают три гетерогенных реакции газификации, а именно, реакция (2),

- гетерогенная реакция на поверхности коксовых частиц (реакция газификации)

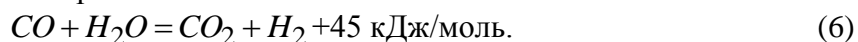


- гетерогенная реакция образования метана



а также одна гомогенная реакция, а именно

-газофазная реакция в объеме пор



Будем рассматривать эти две зоны совместно как одну общую зону. Для удобства описания модели присвоим этим реакциям соответствующие индексы: 4 - реакции (4), 5 - реакции (5) и 6 - реакции (6).

Реагентам смеси, общий индекс «*s*», присвоим индивидуальные индексы: 1 – кислород  $O_2$ , 2 – азот  $N_2$ , 3 – водяной пар  $H_2O$ , 4 – двуокись углерода  $CO_2$ , 5 – окись (монооксид) углерода  $CO$ , 6 – водород  $H_2$ , 7 – метан  $CH_4$ .

Примем для обозначения фаз рассматриваемой гетерогенной системы общий индекс «*s*» и частные индексы «*g*» - газ (gas), «*h*» - твердый (hard) реагент, «*b*» - балласт (ballast).

**Математическая модель VI(кислородной) зоны включает:**

- уравнения тепломассопереноса с химическими реакциями

$$\rho_1 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_1}{dz} = -(W_1 + W_3)M_1, \quad (4)$$

$$\rho_2 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_2}{dz} = 0, \quad (5)$$

$$\rho_3 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_3}{dz} = 0, \quad (6)$$

$$\rho_4 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_4}{dz} = (W_1 - W_2 + 2W_3)M_4, \quad (7)$$

$$\rho_5 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_5}{dz} = (2W_2 - 2W_3)M_5, \quad (8)$$

$$\rho_6 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_6}{dz} = 0, \quad (9)$$

$$\rho_7 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_7}{dz} = 0, \quad (10)$$

$$\rho_C u^* \frac{d\eta}{dz} = (W_1 + W_2)M_C, \quad (11)$$

$$\left[ (w_\phi - u^*) \sum_s c_s \rho_s - u^* (c_C \rho_C + c_b \rho_b) \right] \frac{dT}{dz} = \lambda \frac{d^2 T}{dz^2} +$$

$$(W_1 q_1 + W_2 q_2 + W_3 q_3) - \frac{\alpha}{r} (T - T_0),$$

- уравнение закона Дарси

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{w_\phi}{k_\phi}, \quad (13)$$

- уравнение состояния компонентов газовой фазы

$$\varepsilon p = \varepsilon \sum_s p_s = RT \sum_s \frac{\rho_s}{M_s}, \quad (14)$$

- уравнения концентрации компонентов газовой фазы

$$A_1 = \rho_1 / (\varepsilon M_1), \quad A_2 = \rho_2 / (\varepsilon M_2), \quad A_3 = \rho_3 / (\varepsilon M_3),$$

$$A_4 = \rho_4 / (\varepsilon M_4), \quad A_5 = \rho_5 / (\varepsilon M_5), \quad (15)$$

- стехиометрическое соотношение

$$\rho_C = \rho_C^* (1 - \eta), \quad (16)$$

- макрокинетический закон горения кокса по реакциям газификации (1)-(2)

$$W_1 = K_{C1} S_C (1 - \eta), \quad W_2 = K_{C2} S_C (1 - \eta), \quad (17)$$

$$S_C = \frac{6(1-\varepsilon)/d_0}{1+(\rho_C^*/\rho_b)/(100/A^r-1)},$$

$$K_{C1} = \frac{\beta_1 A_1}{\frac{1}{k_{W1}} + \frac{d_0}{\text{Nu}_D D_1}}, \quad K_{C2} = \frac{\beta_2 A_4}{\frac{1}{k_{W2}} + \frac{d_0}{\text{Nu}_D D_4}},$$

$$k_{W1} = k_1 \exp(-E_1/RT), \quad k_{W2} = k_2 \exp(-E_2/RT),$$

$$\text{Nu}_D = 2 + 2,22 \text{Pe}_D^{2/3}, \quad \text{Pe}_D = w_\phi d_0 / D_j, \quad D_j = D_{0j} (T/T_0)^{3/2},$$

- уравнение скорости газозной реакции (3)

$$W_3 = k_3 A_1 A_5^2 \exp(-E_1/RT), \quad (18)$$

- альтернативное условие прекращения горения

$$p(1-\eta) = 0, \quad (19)$$

- кинематическое условие стационарности процесса (скорости горения)

$$u_f = w_\phi - u^* = 0. \quad (20)$$

### Граничные условия

Граничные условия задачи учитывают, что рассматривается проточный реактор с охлаждаемым входом и секцией с отводящим генерируемый газ устройством, которые нарушают сплошность движения твердофазных компонентов, то есть имеем:

(на выходе из реактора)

$$z = z_{IV} - h = 0, \quad p = p_0, \quad T = T_0, \quad \rho_g w_\phi = m_g^*, \quad A_1 = A_{O_2} = A_1^*, \quad A_2 = A_{N_2} = A_2^*, \quad (21)$$

$$A_3 = A_{H_2O} = A_3^*, \quad A_4 = A_{CO_2} = 0, \quad A_5 = A_{CO} = 0, \quad A_6 = A_{H_2} = 0, \quad A_7 = A_{CH_4} = 0,$$

(на входе в реактор)

$$z = z_{IV} = h, \quad p < p_0, \quad dT/dz = 0, \quad \eta = 0, \quad \rho_C = \rho_C^*. \quad (22)$$

Кроме того, на фронте пламени

$$z = z_{VI} = z_f, \quad dT/dz = 0, \quad A_1 = A_{O_2} = 0. \quad (23)$$

### Математическая модель V и IV (восстановительных) зон включает:

- уравнения тепломассопереноса с химическими реакциями

$$\rho_2 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_2}{dz} = 0, \quad (24)$$

$$\rho_3 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_3}{dz} = -(W_4 + W_6)M_3, \quad (25)$$

$$\rho_4 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_4}{dz} = (W_6 - W_2)M_4, \quad (26)$$

$$\rho_5 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_5}{dz} = (2W_2 + W_4 - W_6)M_5, \quad (27)$$

$$\rho_6 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_6}{dz} = (W_4 + W_6 - 2W_5)M_6, \quad (28)$$

$$\rho_7 \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_7}{dz} = W_5 M_7, \quad (29)$$

$$\rho_C^* u^* \frac{d\eta}{dz} = (W_2 + W_4 + W_6)M_C, \quad (30)$$



$$\left[ (w_{\phi} - u^*) \sum_s c_s \rho_s - u^* (c_C \rho_C + c_b \rho_b) \right] \frac{dT}{dz} = \lambda \frac{d^2 T}{dz^2} - \frac{\alpha}{r} (T - T_0) + (W_2 q_2 + W_4 q_4 + W_5 q_5 + W_6 q_6), \quad (31)$$

- уравнение закона Дарси

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{w_{\phi}}{k_{\phi}}, \quad (32)$$

- уравнения состояния компонентов газовой фазы

$$\varepsilon \sum_s p_s = RT \sum_s \frac{\rho_s}{M_s}, \quad (33)$$

- уравнения концентрации компонентов газовой фазы

$$A_2 = \rho_2 / (\varepsilon M_2), \quad A_3 = \rho_3 / (\varepsilon M_3), \quad A_4 = \rho_4 / (\varepsilon M_4), \\ A_5 = \rho_5 / (\varepsilon M_5), \quad A_6 = \rho_6 / (\varepsilon M_6), \quad A_7 = \rho_7 / (\varepsilon M_7), \quad (34)$$

- стехиометрическое соотношение

$$\rho_C = \rho_C^* (1 - \eta), \quad (35)$$

- макрокинетический закон газификации кокса по реакциям макрокинетики (2), (4) и (5)

$$W_2 = K_{C2} S_C (1 - \eta), \quad W_4 = K_{C4} S_C (1 - \eta), \quad W_5 = K_{C5} S_C (1 - \eta), \quad (36)$$

$$S_C = \frac{6(1 - \varepsilon)/d_0}{1 + (\rho_C^*/\rho_b)/(100/A^r - 1)},$$

$$K_{C2} = \frac{\beta_2 A_4}{\frac{1}{k_{W2}} + \frac{d_0}{\text{Nu}_{D4} D_4}}, \quad K_{C4} = \frac{\beta_4 A_3}{\frac{1}{k_{W4}} + \frac{d_0}{\text{Nu}_{D3} D_3}}, \quad K_{C5} = \frac{\beta_5 A_6}{\frac{1}{k_{W5}} + \frac{d_0}{2\text{Nu}_{D6} D_6}},$$

$$k_{W2} = k_2 \exp(-E_2/RT), \quad k_{W4} = k_4 \exp(-E_4/RT), \quad k_{W5} = k_5 \exp(-E_5/RT),$$

- макрокинетический закон газовой фазной реакции (16)

$$W_6 = k_6 A_3 A_5 \exp(-E_6/RT), \quad (37)$$

- альтернативное условие прекращения горения

$$p(1 - \eta) = 0, \quad (38)$$

- кинематическое условие стационарности процесса (скорости горения)

$$u_f = w_{\phi} - u^* = 0. \quad (39)$$

Граничные условия задачи для восстановительных зон есть условия на входе в реактор (при  $z = h$ ), дополненные соотношениями для концентраций компонентов смеси и термодинамическими условиями на выходе из кислородной зоны, а именно, имеем:

- на фронте пламени

$$z = z_{VI} = z_f, \quad (40)$$

$$dT/dz = 0, \quad T = T_f, \quad p = p_f, \quad \eta = \eta_f,$$

$$A_1 = A_{O2} = 0, \quad A_2 = A_{N2} = A_{2f}, \quad A_3 = A_{H2O} = A_{3f}, \quad A_4 = A_{CO2} = A_{4f},$$

$$A_5 = A_{CO} = A_{5f}, \quad A_6 = A_{H2} = 0, \quad A_7 = A_{CH4} = 0;$$

- на границе с секцией с отводящим генерируемый газ устройством (на входе в реактор)

$$z = z_{IV} = h,$$

$$p < p_f, \quad dT/dz = 0, \quad \eta = 0, \quad \rho_C = \rho_C^*. \quad (41)$$

Апробации этих математических моделей слоевого горения угля в настоящее время реализуется численными методами в среде «SciLab».

#### Список литературы:

1. Технологии газификации в плотном слое: монография / Р.Ш. Загрутдинов, А.Н. Нагорнов, А.Ф. Рыжков, П.К. Сеначин и др.; под ред. П.К. Сеначина. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2009. – 296 с.
2. Физико-химические основы горения и газификации углей в плотном слое газификатора Lurgi / А. Н. Нагорнов, Р. Ш. Загрутдинов, П. К. Сеначин, С. М. Кисляк, Р. М. Утемесов // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008): Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1-4 октября 2008. - Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2008. - С. 380-397.
3. Степанов, С.Г. Математическая модель газификации угля в слоевом реакторе / С.Г. Степанов, С.Р. Исламов // Химия твёрдого топлива. - 1991. - № 2. - С. 52-58.
4. Кузоватов, И.А. Численное моделирование физико-химических процессов в слоевом газификаторе / И.А. Кузоватов, А.А. Гроо, С.Г. Степанов // Вычислительные технологии. - 2005. - Т.10. - №5. - С. 39-48.
5. Ворончихина, Т.С. Компьютерная модель нестационарных процессов при слоевой газификации угля / Т.С. Ворончихина, В.С. Славин, С.Р. Исламов // Сибирский физико-технический журнал. - 1993. - Вып. 3. - С. 85-90.
6. Маришин, Н.С. Численное моделирование газификации угля в плотном слое / Н.С. Маришин, Д.Р. Таймасов, П.К. Сеначин // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Материалы IX Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 16-18 ноября 2015 г. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2015. – ISBN 978-5-89017-043-9. - Доклад D2\_P10. - (4 с.). – Режим доступа: [www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/Files/D2\\_P10/pdf](http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/Files/D2_P10/pdf)
7. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. - Л.: Химия, 1979. - 176 с.
8. Леонтьев, Н.Е. Основы теории фильтрации: Учебное пособие / Н.Е. Леонтьев. - М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. - 88 с.
9. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 312 с.

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА НА ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Шибков К. В. – студент, Кулманаков С. П. - к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

С каждым годом ужесточают нормы выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания. В связи с этим встает вопрос об экологической безопасности автомобилей, одной из самых актуальных проблем двигателестроения.

Экологическая безопасность - это свойство автомобиля снижать негативные последствия влияния эксплуатации автомобиля на участников движения и окружающую среду. Она направлена на снижение токсичности отработанных газов, уменьшение шума, снижение радиопомех при движении автомобиля. Несмотря на многочисленные попытки заменить двигатель внутреннего сгорания каким-либо другим, не выделяющим токсичные вещества, альтернативы ему пока нет. А если принципиально новый двигатель и появится, то переналадка производства для его крупносерийного выпуска потребует грандиозных капиталовложений и произойдет далеко не сразу. Вместе с тем уже сейчас человечество подошло к той черте, когда без экологически чистого автомобиля просто не обойтись. И

выход пока видится один –необходимо, если не полностью исключить, то во всяком случае свести к минимуму вредные выбросы ДВС.

Основными направлениями обеспечения экологической безопасности ДВС являются:

- подавление эмиссии токсичных веществ в процессе сгорания топлива;
- снижение содержания токсичных веществ в отработавших газах вне рабочей полости цилиндра (нейтрализация отработавших газов);
- использование топлив, не содержащих (или содержащих допустимый минимум) токсичных веществ и не образующих таковых при сгорании;
- предотвращение выброса вредных веществ помимо ОГ.

Для снижения выбросов токсичных веществ наиболее эффективно применение нейтрализаторов, в которых основные токсичные вещества, содержащиеся в отработавших газах (СО, СН и NO<sub>x</sub>), в результате химических реакций с кислородом или между собой образуют нетоксичные газы.

Различают два типа нейтрализаторов: термические и каталитические. Все более широкое применение находит "дожигание" отработавших газов, обеспечивающее высокую степень нейтрализации. В термореакторе осуществляется процесс пламенного дожигания оксида углерода СО и превращения его в углекислый газ СО<sub>2</sub>, а также сжигание несгоревших в цилиндре углеводородов и альдегидов. Термореактор устанавливается за выпускным трубопроводом. Для интенсификации процесса дожигания в камеру термореактора подается дополнительный воздух. Реакция окисления происходит при температуре 500 – 600 °С и снижает наличие углеводородов примерно в 2 раза, а оксида углерода – в 2 – 3 раза. Каталитические нейтрализаторы, помимо окисления СО и СН, могут осуществлять еще и разложение оксидов азота NO<sub>x</sub>. Испытания нейтрализаторов показали, что уровень СОв отработавших газах снижается на 80 %, СН – на 70 %, а NO<sub>x</sub>– на 50 %. В целом токсичность отработавших газов уменьшается в 10 раз. В нейтрализаторах часто в качестве катализатора используется оксид алюминия. Как и в термореакторе, процесс окисления СО и СН требует подачи дополнительного воздуха, а процесс восстановления оксида азота NO<sub>x</sub>не требует подачи воздуха. Современные каталитические нейтрализаторы выполняются в виде двухкамерного реактора. В одной из камер осуществляется окисление СОи СН, а во второй – восстановление NO<sub>x</sub>.

В качестве примера рассмотрим анализ социально-экологического ущерба дизеля Д-3061 при эксплуатации без установки и с установкой каталитического нейтрализатора:

Выброс компонента без установки каталитического нейтрализатора:

$$m_i = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^n N_{ej} \cdot \tau_j \cdot C_{1ij}, m / год.$$

$$C_{CO}=1,8 \text{ г/кВт*ч};$$

$$C_{NOx}=5,7 \text{ г/кВт*ч};$$

$$C_{CH}=0,4 \text{ г/кВт*ч};$$

$$C_C= 0,19 \text{ г/кВт*ч}.$$

Годовой экономический ущерб без установки каталитического нейтрализатора:

$$W = \frac{\gamma \cdot d \cdot \sigma \cdot M_{ог}}{R}, \text{ тыс. усл.ед} / \text{ год};$$

$$W = \frac{0,24 \cdot 1 \cdot 0,15 \cdot 33,68}{22} = 0,055 \text{ тыс. усл.ед} / \text{ год}.$$

Выброс компонента с установкой каталитического нейтрализатора:

Каталитический нейтрализатор снижает выбросы:

СО - на 70%; СН – на 70%; NO<sub>x</sub> - на 50% ;

$$C_{CO}= 0,54 \text{ г/кВт*ч};$$

$$C_{NOx}= 2,0 \text{ г/кВт*ч};$$

$$C_{CH} = 0,12 \text{ г/кВт*ч};$$

$$C_C = 0,025 \text{ г/кВт*ч}.$$

Годовой экономический ущерб с нейтрализатором:

$$W = \frac{0,24 \cdot 1 \cdot 0,15 \cdot 10,05}{22} = 0,0164 \text{ тыс. усл.ед/год}.$$

Снижение ущерба:

$$\Delta W = 0,055 - 0,0164 = 0,0386 \text{ тыс. усл.ед/год}.$$

Эффективность:

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{0,0386}{0,055} \cdot 100\% = 70,2\% .$$

Вывод: Эффективность установки каталитического нейтрализатора составила 70,2%. Этим подтверждается целесообразность установки катализаторов на дизель для снижения вредных выбросов при их работе, а значит и уменьшения пагубного воздействия на человека и окружающую среду, однако целесообразно устанавливать перед катализатором фильтр, улавливающий мелкие частицы, такие как сажа, так же данный фильтр увеличит ресурс катализатора.

#### Список литературы:

1. Свистула, А.Е. Расчет экологического ущерба при эксплуатации ДВС: методические указания [Текст] / А.Е. Свистула; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. - 19 с

2. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст] / А. И. Колчин, В. П. Демидов. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2002. - 496 с.

#### УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ С ОБЪЕМНЫМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕМ

Шевелёв Е.О. - студент, Богданов В.В. – студент, Пыжанкин Г.В. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Проблеме создания макро - и микровихрей в цилиндре дизелей с пленочным или объемно-пленочным смесеобразованием уделено достаточно большое количество работ как отечественных, так и зарубежных исследователей.

В работе [1] показано, что дизельных двигателя с объемно-пленочным смесеобразованием для повышения качественного сгорания топлива необходимо осуществлять закрутку потока воздуха в цилиндре посредством впускных каналов. Интенсивность вихревого движения воздуха зависит от многих параметров: конструкции камеры сгорания, количества впускных клапанов на цилиндр, угла их фаски, давления впрыска, диаметра и количества сопловых отверстий в распылителе форсунки, степени сжатия.

В таких двигателях с одним впускным клапаном на цилиндр канал впуска выполняют тангенциальным или винтовым с тангенциальным расположением в зависимости от требуемой интенсивности закрутки воздуха. С двумя впускными клапанами расположение каналов впуска может быть последовательным или параллельным. От их расположения будет зависеть сложность конструкции механизма газораспределения, интенсивность вихрей и их взаимное влияние друг на друга. Конструкция с двумя клапанами предпочтительнее с точки зрения улучшения наполнения цилиндра свежим зарядом и уменьшения гидравлических сопротивлений.

Однако применительно к дизелям с объемным смесеобразованием о целесообразности создания осевого вихря, его интенсивности информация весьма ограничена. При

кинорегистрации процессов смесеобразования дизеля ЧН21/21 с камерой сгорания Гессельман [2] отмечено ухудшение процесса тепловыделения из-за скапливания топлива в периферийной зоне. Исследования при форсировании дизеля 6ЧН15/18 с аналогичной камерой сгорания на кафедре ДВС АлтГТУ также показали при снятии головки цилиндров, что при большой цикловой подаче топлива факел топливной струи достигает стенок поршня.

Из закона сохранения энергии следует, что с увеличением интенсивности закрутки, будут увеличиваться гидравлические сопротивления, которые в свою очередь увеличат насосные потери и соответственно расход топлива на увеличенные механические потери. Данные о распределении механических потерь в ДВС, в том числе [3] приведенные в таблице 1, показывают, что механические потери от трения в КШМ занимают ведущее положение и составляют свыше 65 % суммарных механических потерь, а потери на газообмен свыше 13%.

Таблица 1 – Распределение механических потерь в ДВС

Составляющие механических потерь	В % к общим потерям	
	Ди зель	Карбюраторный
1 На трение в КШМ	69, 4	66
2 На привод агрегатов и ГРМ	17, 3	14
3 На газообмен	13, 3	20

Исходя из этого, желательно иметь оптимум закрутки, однако она зависит от частоты вращения, цикловой подачи топлива и т.д. Следовательно, величина закрутки и наполнение свежим зарядом не будут оптимальными для всего диапазона работы дизеля, что отразится на технико-экономических показателях дизеля.

Для детального анализа протекания рабочего процесса 6ЧН15/18 с объемным смесеобразованием был применен метод предложенный профессором Д. Д. Матиевским [3]. В данном методе КПД представлен в виде следующих составляющих:

$$\eta_i = 1 - \Delta X_{нп} - \delta_э - \delta_т - \delta_c - \delta_{нс} - \delta_w - \delta_o$$

Данное уравнение описывает баланс единицы располагаемой теплоты, вводимой в цилиндр с топливом. Коэффициент  $\Delta X_{нп}$  характеризует неполноту выделения теплоты, связанную с недогоранием или прямыми потерями топлива. Остальные коэффициенты, обозначенные через  $\delta$ , есть коэффициенты неиспользования теплоты в цикле:  $\delta_э$  – в эталонном цикле;  $\delta_т$  и  $\delta_c$  – от изменения температуры и состава рабочего тела (изменение показателя адиабаты  $\kappa$  в цикле);  $\delta_{нс}$  – от несвоевременности ввода теплоты;  $\delta_w$  – по разнообразным причинам отвода теплоты по ходу развития цикла;  $\delta_o$  – остаточные (неучтенные) потери.

Обработка индикаторных диаграмм экспериментальных данных дизеля 6ЧН15/18 по нагрузочной характеристике  $P_e = 0,4 - 1,15$  МПа при частоте вращения  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> с серийной головкой цилиндров и опытной головкой с увеличенными на 20 – 25% эффективными проходными сечениями каналов впуска и выпуска  $\mu_f$  показала следующие результаты:

– Коэффициент неиспользования теплоты в эталонном цикле  $\delta_э$  имеет наибольшую величину (около 34,3%) для обеих комплектаций и по нагрузке практически не изменяется. Следует отметить, что улучшение экономичности двигателя за счет уменьшения данного коэффициента ограничивается, как правило, ростом максимальных давлений сгорания  $P_z$  и

температур  $T_z$ , а также увеличением других составляющих, зависящих от этих параметров – коэффициенты  $\delta_T$  и  $\delta_w$ .

– Коэффициент неиспользования теплоты от изменения состава рабочего тела  $\delta_c$  имеет незначительное увеличение (от 0,5% до 2%) и практически мало влияет на экономичность двигателя.

– Коэффициент  $\delta_T$  увеличивается с 7% до 8,5% в связи с ростом температуры по нагрузке и несколько ниже с опытной головкой в связи с увеличением наполнения цилиндров свежим зарядом.

– Коэффициент  $\delta_w$  снижается по нагрузке незначительно (в среднем около 3%) и несколько ниже с опытной головкой из-за меньшей температуры.

– Коэффициент неиспользования теплоты  $\delta_{nc}$  с ростом нагрузки увеличивается от 4% до 11% у серийной и 10% у опытной головки. Это можно объяснить тем, что с большей цикловой подачей топлива его факел достигает стенок камеры сгорания, и интенсивность выгорания снижается.

В целом индикаторный  $kpd\eta_i$  по нагрузке снижается от 0,48 до 0,41 у серийной и до 0,43 у опытной головки вследствие улучшения наполнения свежим зарядом. Для дальнейшего повышения  $\eta_i$  кроме увеличения наполнения необходима организация осевого воздушного вихря, оптимизация параметров впрыскивания топлива при согласовании их с интенсивностью вихря и геометрией камеры сгорания.

#### Список литературы:

1. Фролкин, А. С. Методика доводки газодинамических параметров впускных и выпускных каналов дизеля [Текст] / А. С. Фролкин // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008). Материалы второй всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под ред. Д. Д. Матиевского, П. К. Сеначина. – Алт. гос. техн. ун-т им И. И. Ползунова, Барнаул : ОАО «Алтайский дом печати», 2008. – С. 230 – 234.

2. Некоторые особенности протекания рабочего процесса в камерах сгорания дизелей при объемном смесеобразовании [Текст] / В. И. Бейлин и др. // Совершенствование быстроходных дизелей. Тезисы докладов международной научно-техн. конф. – Барнаул : изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1993. – С. 77 – 79.

3. Матиевский, Д. Д. Методика анализа индикаторного КПД [Текст] / Д. Д. Матиевский // Двигателестроение. – 1984. – №6. – С. 7 – 11.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВПРЫСКА ВОДЫ

Борисов Д.С. - студент, Свистула А.Е. – д.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Многочисленные исследования показали, что вода в составе водотопливной эмульсии (ВТЭ) способствует разрушению переобогащенных топливом зон в камере сгорания, уменьшению неоднородности в распределении топлива по окислителю, интенсификации процессов смесеобразования и сгорания, увеличению задержки воспламенения, снижению выбросов сажи и окислов азота с ОГ. Однако нет однозначного мнения относительно изменения жесткости, максимального давления в цикле и экономичности [1].

Способы введения воды в рабочий цикл можно разделить на четыре основные группы (рисунок 1). Первая – присадка воды рабочему телу, вторая – к свежему заряду, третья – к перепускаемому ОГ, четвертая – к топливу. По функциональному назначению, сложности технического воплощения, качеству исполнения и надежности работы каждая группа способов имеет свои преимущества и недостатки.

Первая группаспособов реализуется подачей воды в цилиндр чаще всего в процессе сгорания, используется главным образом для целей снижения тепловой напряженности и в данной работе не рассматривается. Способы второйи третьей групп оказывают решающее влияние на подавление окислов азота и токсичности двигателя в целом. Из способов четвертой группы большую известность получил способ, основанный на подготовке и использовании ВТЭ. Только ВТЭ позволяют улучшить качество смесеобразования [3].

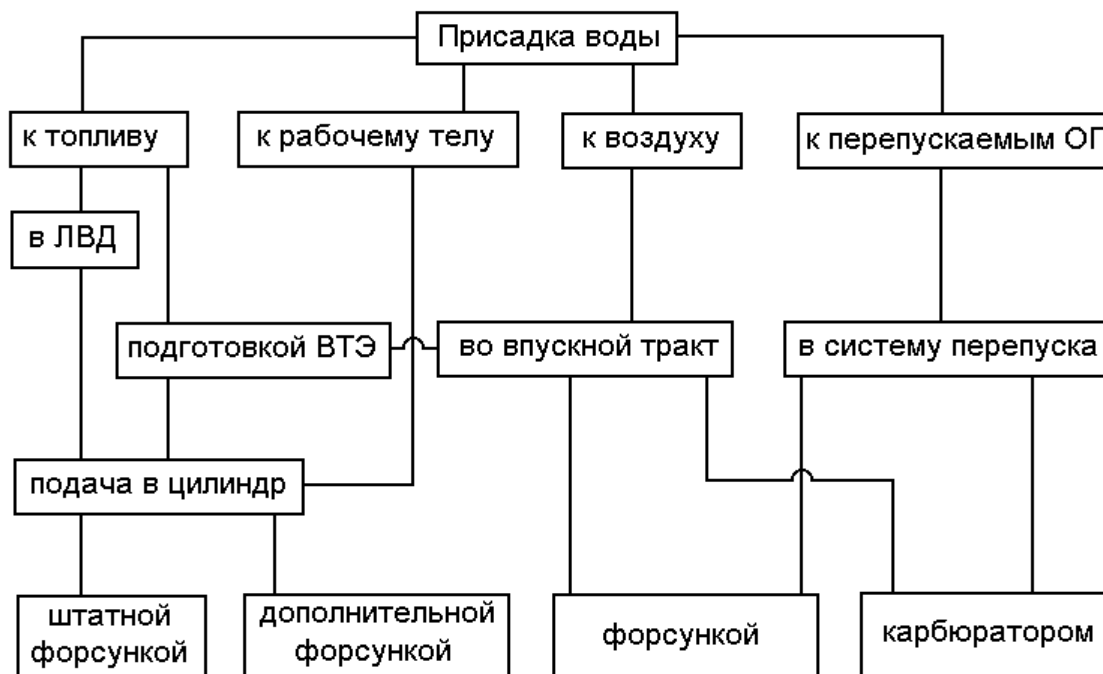


Рисунок 1 – Способы введения воды в рабочий цикл ДВС

Как правило, ВТЭ готовится в отдельной емкости с использованием диспергаторов с последующей подачей ее через штатную систему питания. Для получения ВТЭ на базе дизельных топлив целесообразно использование гидравлических или механических типов диспергаторов (роторно-пульсационных или дезинтеграторов), последние позволяют получить ВТЭ дисперсностью 1-3 мкм с энергозатратами не более 0,01-0,015 кВт/кг ВТЭ, имеющие привод с частотой вращения 1500-3000 мин<sup>-1</sup> как непосредственно от дизеля, так и от автономного электродвигателя [4].

Серьезной проблемой при создании ВТЭ на базе дизельных топлив является выбор эмульгаторов на основе ПАВ для стабилизации ВТЭ, удовлетворяющих множеству требований. Однако до настоящего времени эмульгаторы, полностью отвечающие всем требованиям, пока еще не созданы.

Другой проблемой при подготовке ВТЭ в емкости является то, что для обеспечения оптимальной работы дизеля на каждом скоростном и нагрузочном режиме целесообразно использовать ВТЭ определенного состава [6].

Отсюда, целесообразно готовить ВТЭ непосредственно перед впрыском. Известны работы по осуществлению присадки воды в линию высокого давления (ЛВД) [7, 8]. Системы топливоподачи с регулированием начального давления (РНД) предоставляют возможность регулирования состава ВТЭ в функции от режима работы дизеля. В них вода подается в необходимых количествах через специальный клапан РНД в ЛВД вблизи форсунки, которая сама является хорошим диспергатором. Расход воды зависит от остаточного давления, которое выше на режимах полных нагрузок и высоких частот вращения, а со снижением нагрузки и частоты вращения остаточное давление падает. Для увеличения расхода присадки воды требуется увеличение длины (соответственно объема) нагнетательного трубопровода и

объема разгрузки. Описанная система позволяет подавать до 20% воды на полных нагрузках и до 30% - на режимах малых нагрузок [8], что вряд ли соответствует оптимуму, т.к. интенсификация смесеобразования и снижение теплонапряженности требуется именно на режимах высоких нагрузок. Недостатком подачи воды через систему РНД является следующее: недостаточная концентрация присадки, некорректное управление составом ВТЭ, увеличенный объем ЛВД, большое количество деталей ЛВД, подвергающихся коррозионному воздействию воды.

На кафедре ДВС АлтГТУ разработана система добавки воды в топливо по патенту на полезную модель 42073. Система питания дизеля содержит резервуар с углеводородным топливом, источник присадки, топливный насос высокого давления, снабженный управляющим органом и сообщенный с резервуаром, регулятор, кинематически связанный с управляющим органом, и, по меньшей мере, одну форсунку. В корпусе форсунки выполнены канал подачи углеводородного топлива к распылителю, связанный при помощи трубопровода высокого давления с топливным насосом, канал подачи присадки к распылителю со смесительной камерой, снабженной обратным клапаном. Этот канал соединен с магистралью подачи присадки. Воздушный баллон высокого давления соединен через регулятор с топливным насосом и емкостью для подачи присадки, связанной с источником присадки и через магистраль подачи присадки с форсунками. В качестве присадки использована вода, а смесительная камера одновременно является эмульгирующей. Заявленная полезная модель позволяет повысить топливную экономичность, снизить токсичность двигателя посредством оперативного управления расходом присадки воды и соответственно составом образуемой водотопливной эмульсии в соответствии с режимом работы двигателя, а также повысить долговечность системы питания [2, 5].

Установлено, что при использовании присадки воды существуют факторы, имеющие противоположное влияние на индикаторный КПД, что предопределяет наличие его максимума при оптимальной величине присадки воды к топливу.

Экспериментально получена характеристика оптимального состава ВТЭ для различных нагрузочных режимов.

При использовании присадки воды к дизельному топливу экспериментально достигнуто снижение удельного индикаторного расхода топлива на 4...5 %, выбросов сажи с ОГ на 25...45 % и окислов азота на 30 % при некотором увеличении жесткости работы дизеля (до 5 %). Получено увеличение индикаторного КПД  $\eta_i$  на 4...5 % при работе дизеля с присадкой воды, которое определяется уменьшением неиспользования теплоты в цикле вследствие несвоевременности  $\delta_{нс}$  и неполноты  $\Delta_{нп}$  сгорания, теплообмена  $\delta_{вт}$ , изменения температуры  $\delta_t$  рабочего тела.

#### Список литературы:

1. Тактак, А. Разработка системы присадки воды к дизельному топливу [Текст] / А. Тактак, А.Е. Свистула // Наука и молодежь: 1-я Всероссийская науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых / АлтГТУ. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – 96-97 с.
2. Свистула, А.Е. Исследование индикаторного процесса дизеля с присадкой воды к рабочему телу [Текст] / А.Е. Свистула, А. Тактак // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей / Академия транспорта РФ, АлтГТУ. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – 22-28 с.
3. Матиевский, Д.Д. Анализ воздействия присадки воды к рабочему телу в дизеле на показатели цикла и индикаторный КПД [Текст] / Д.Д. Матиевский, А.Е. Свистула, А. Тактак // Вестник Алтайской науки. – 2004. вып.1. – 234-237 с.
4. Матиевский, Д.Д. Осуществление присадки воды к топливу и ее влияние на показатели цикла и индикаторный КПД дизеля [Текст] / Д.Д. Матиевский, А.Е. Свистула, А. Тактак / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2004. – №2. – 105-110 с.



5. Патент на полезную модель 42073 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>F 02 М 25/022. Система питания дизеля [Текст] / Свистула А.Е., Матиевский Д.Д., Калюжный Е.М., Тактак А. (РФ) – № 2004121938/22; заявл. 19.07.2004; опубл. 20.11.04, Бюл. №32.

6. Семенов, К.А. Повышение экономичности судовых дизелей за счет использования водотопливных эмульсий тяжелых топлив: автореф. дисс....канд.техн.наук / К.А. Семенов / ЦНИДИ – Л.:ЦНИДИ, 1986. – 25 с.

7. Патрахальцев, Н.Н. Дизели: система регулирования начального давления впрыскивания топлива [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко, В.Л. Виноградский // Автомобильная промышленность. – 2002. – №3. – 14-16 с.

8. Шархабиль, А.Х. Снижение токсичности выбросов и повышение экономичности малоразмерного высокооборотного дизеля подачи воды в цилиндры: автореф. дисс....канд.техн.наук / А.Х. Шархабиль; РУДН. – М., 2000. – 16 с.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ (КС) ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Зуев А.А. –к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Доля радиационного теплообмена в камере сгорания (КС) дизельного ДВС настолько высока, что использование аддитивного подхода при определении полного теплового потока, переданного от рабочего тела в стенки КС, недопустимо. Это обстоятельство было рассмотрено в работе [1].

Причем, вся лучистая теплота передается в течение короткого промежутка времени на линии сгорания-расширения, поэтому тепловоспринимающие поверхности КС испытывают достаточно мощные циклические «тепловые удары».

Относительное количество теплоты, передаваемой деталям ЦПГ в результате радиационного излучения, составляет в среднем за рабочий цикл 20-40 % от суммарной теплопередачи в зависимости от типа двигателя, степени форсирования, режима работы и др. [2].

Метод исследования лучистого теплообмена в ДВС, предложенный Л.М.Белинским [3], в дальнейшем был развит рядом ученых: П.Флин, А.Эплер, С.А.Батурин, В.А. Синицын, В.Н.Ложкин и другими учёными.

Автор тезиса так же занимался изучением лучистого теплообмена.

При проведении «целевых» исследований решались следующие задачи:

- получить достоверные экспериментальные данные по степени черноты для различных поверхностей КС – как для дизельных, так и для бензиновых двигателей разного типа и назначения,

- определить зависимость степени черноты от температуры исследуемой поверхности.

Экспериментальному исследованию подвергались образцы из поршней дизельных двигателей А-41, Д-37, ЯМЗ-740, взятые после 50 часов работы двигателя в условиях реальной эксплуатации. Результаты эксперимента представлены в работе [4].

Представляет практический интерес процессы образования нагароотложения и сажеобразования на поверхностях КС. В исследованиях проводимых ранее автором эти вопросы не рассматривались. Нагар образуется в результате неполного сгорания топлива и смазочного масла в обедненных кислородом зонах, оказывает существенное влияние на протекание рабочего процесса.

Механизм сажеобразования рассмотрен в работе [5]. При сжигании 1 кг дизельного топлива в среднем получается 3 – 5 г сажи. Размеры частиц сажи составляют 0,01 – 1,0 мкм. Визуальные наблюдения с помощью электронного микроскопа показали, что форма частиц

сажи близка к сферической. Часто они сгруппированы в ансамбль из нескольких шарообразных частиц, напоминающих по внешнему виду кластер или рыхлый комок.

Из области турбулентной диффузии, представляющей собой совокупность вихрей, охватывающих частицы газа и сажи, вырывается частица сажи, обладающая наиболее высокой энергией. Покидая окружающий ее вихрь, она перемещается на расстояние  $S$ , пока не попадет на поверхность стенки (рис.1). Частицы на поверхности стенки (т.е. образование нагароотложения) наиболее сильно удерживаются на тех участках, где в результате окисления топлива и смазочного масла образуются тонкие смолисто-лаковые пленки.

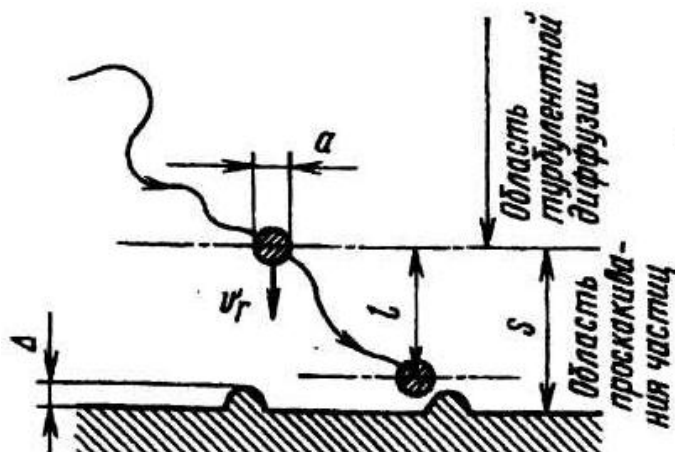


Рисунок 1 - Схематическое изображение осаждения частиц сажи на поверхности стенки

Диаграмма образования и выгорания сажи в быстроходном дизеле при его работе в режиме полной нагрузки приведены на (рис.2) [6].

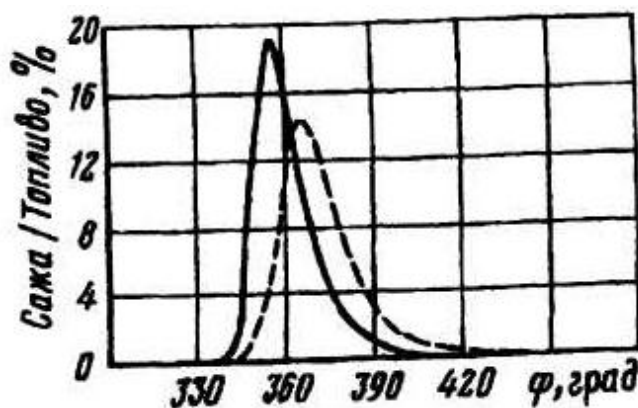


Рисунок 2 - Типичные диаграммы скоростей образования (—) и выгорания (- - -) сажи в быстроходном дизеле

### Выводы:

1. Установлено, что процесс горения твердых частиц в цилиндре дизеля представляет собой комплекс сложных взаимосвязанных физико-химических явлений, проходящих в условиях быстроменяющихся температур, давлений и концентраций реагирующих компонентов.

2. Экспериментально доказано, что происходит выгорание сажи на тепловоспринимающих поверхностях КС. Исходя из этого процессы образования и выгорания частиц сажи на поверхностях КС дизелей требуют более глубокого изучения.

3. Возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований и определении степени черноты поверхностей КС дизеля в период выгорания сажи. Именно этому и будут посвящены следующие экспериментальные исследования.

#### Список литературы:

1. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учеб.пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. – 592 с., ил.
2. Сеницын В.А. Аналитические методы исследования теплообмена в ДВС: Учебное пособие / Алт. гос. техн. ун-т. – Барнаул : Б., 1993. – 69 с.
3. Белинский Л.М. Теплоизлучение в камере сгорания быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия. Исследование рабочего процесса и подачи топлива в быстроходных двигателях // Тр. НИИД. Л.; М. Машгиз. 1955. с. 83-114.
4. Зуев А.А. Экспериментальное определение локальной степени черноты деталей ЦПГ дизелей: Межвуз. Сб. научн. Тр. – Барнаул, 1991. – с. 94-101.
5. Страдомский М.В., Максимов Е.А. Оптимизация температурного состояния деталей дизельных двигателей. Киев, 1987.
6. Churchill R. A., Smith J. E., Clark N. N., Turton R. A. Low-Heat Rejections Engines-a concept review // SAE Techn. Pap.Ser. 1989.№ 890153. P. 25-36.