



Министерство образования  
Республики Беларусь



Белорусский национальный технический  
университет



Энергетический факультет

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Материалы 65–й научно – технической конференции  
студентов и аспирантов**

**Электронное издание**

**Минск 2013**

УДК 621.311  
ББК 31 я 43  
А 43

**Р е ц е н з е н т**

Доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники УО БГТУ, к.т.н. *О.И.Александров*

В сборник включены тезисы докладов 65–й научно-технической конференции студентов и аспирантов БНТУ по секциям: «Электрические станции»; «Электрические системы»; «Электроснабжение»; «Тепловые электрические станции»; «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»; «Электротехника и электроника»; «Экономика и организация энергетики».

Белорусский национальный технический университет.  
Энергетический факультет.  
пр-т Независимости, 65/2, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: (017) 292-42-32 Факс: 292-71-73  
E-mail: ef@bntu.by  
<http://www.bntu.by/ef.html>  
Регистрационный № ЭИ БНТУ/ЭФ39-45.2013

© Жуковская Т.Е., компьютерный дизайн, 2013  
© БНТУ, 2013

**СЕКЦИЯ 5 ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И  
ТЕПЛОТЕХНИКА  
ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА  
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

Левков К.Л.

Научный руководитель Романюк В.Н. к.т.н, профессор

**БЕСПЛАМЕННОЕ ОКИСЛЕНИЕ. ГОРЕНИЕ С НИЗКИМ ОБРАЗОВАНИЕМ  
 $NO_x$  ТАКЖЕ ПРИ СИЛЬНОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ПОДОГРЕВЕ ВОЗДУХА  
ДЛЯ ГОРЕНИЯ.**

Македон Н. Е.

Научный руководитель Ярмольчик Ю. П., к.т.н., доцент

**ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ – ОСНОВА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ БУДУЩЕГО**

Михаленок Е. Е.

Научный руководитель Сапун Н.Н. к.т.н., доцент

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПЛАНТАЦИИ БИОМАССЫ – НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В  
ЛЕСОВОДСТВЕ И ЗЕМЛЕДЕЛИИ**

Шишпар С.Г.

Научный руководитель к. т. н, доцент Лосюк Ю.А.

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ  
КОМБИНИРОВАННОГО МНОГОФАЗНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В  
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ**

Ярмольчик Н. М.

Научный руководитель Есьман Р. И., д. т. н., профессор

**РАЗВИТИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕГАВАТТНОГО  
КЛАССА**

Лукуть А.С.

Научный руководитель Лосюк Ю.А. к.т.н, доцент

УДК 622.324

## **Повышение эффективности использования природного газа за счет совершенствования систем газораспределения**

Левков К.Л.

Научный руководитель Романюк В.Н. к.т.н, профессор

В мире с каждым годом увеличивается понимание необходимости более рационального использования энергоресурсов, снижение нагрузки на окружающую среду, в том числе, и за счет утилизации вторичных энергетических ресурсов. В данной работе рассматривается возможность использования избыточного давления природного газа (ПГ) в ходе процессов понижения его давления до значений, требуемых потребителю. Давление ПГ сначала снижается на газораспределительных станциях с 3,5 – 7,5 МПа до 0,3 – 1,2 МПа, затем на газораспределительных пунктах до 0,005 – 0,6 МПа. Для понижения давления потоков традиционно применяют дросселирование, при этом происходит диссипация потенциальной энергии, связанной с избыточным давлением газа. Такое положение оправдано в условиях, с одной стороны, наличия дешевой энергии, с другой стороны, при отсутствии недорогих и надежных машин, систем автоматического управления, обеспечивающих безусловное протекание процесса, в котором снижение давления, являющееся целевым эффектом, сопровождается побочным эффектом — энергообменом с внешними объектами в форме технической работы.

Сегодня ситуация изменилась в нужном направлении и на рынках энергоресурсов, и в отношении комплекса факторов, от которых зависит возможность надежной эксплуатации устройств, обеспечивающих снижение давления газового потока с одновременным блокированием рассеяния энергии среды, находящейся при избыточном давлении. Основным оборудованием таких устройств являются машины, в которых давление газа уменьшается, как правило, в процессе адиабатного расширения. Это, прежде всего, турбомашин, которые в контексте целей их использования являются утилизационными турбинами. Одним из первых и успешных примеров подобного их применения в 60-е годы XX века явилась установка на домне №4 Череповецкого металлургического завода комплекса ГУБТ-10, мощностью 10 МВт, предназначенного для снижения давления доменного газа от начального давления 5 ат до давления, требуемого для транспортировки газа до горелочных устройств огнетехнических установок и одновременного получения работы, используемой для привода электрогенератора. Маркировка указанного устройства расшифровывается просто и понятно: «Газовая утилизационная бескомпрессорная турбина мощностью 10 МВт». Получение электроэнергии подобным способом снижает нагрузку на окружающую среду, поскольку на соответствующую величину уменьшает необходимость генерации этой формы энергии на тепловых электростанциях.

Наиболее массовое и перспективное применение подобных турбогенераторов связано с транспортировкой и обработкой природного газа на газораспределительных станциях и пунктах. Здесь такие утилизационные турбины, по недоразумению, получили название, пришедшее из холодильной техники, где целью их использования является охлаждение потока, а побочным эффектом — получение работы. В этом случае соответствующие устройства называются детандерами. В рассматриваемом случае понижение температуры газа, вызванное протеканием процесса адиабатного расширения, как раз приходится блокировать нагревом потока перед или (и) после реализации процесса.

В Республике Беларусь такие установки не производятся. Существует ряд производителей, изготавливающих турбодетандерные установки различной мощности. Например, в России ОАО «Криокор» (Москва) выпускает детандер-генераторные агрегаты ДГА-5000 и ДГА-2500, соответственно мощностью 5 и 2,5 МВт; АО «Турбохолод» предлагает агрегат АТД 8/5-3,2 мощностью 8,5 МВт. В Украине их производят ОДО «Турбогаз» (Харьков), «Мотор Сич» (Запорожье) и др.

В странах западной Европы такие установки выпускают «Atlas Copco» (Бельгия), «ABB Turbienen» (Нидерланды), «Test Alpine Linz» (Австрия), в Северной Америке — «San-Diego and Electric» (США), в Израиле — «Ormat» и т.д.

Установки, мощность которых составляет несколько мегаватт, применяются в системах газообеспечения крупных объектов с непрерывным, большим, на уровне одного миллиона кубометров, часовым потреблением газа. В Республики Беларусь существует ограниченное число таких объектов: крупные города, крупные тепловые электрические станции, большие заводы. В настоящее время в Республики Беларусь эксплуатируются подобные установки на Лукомльской ГРЭС (5+2,5 МВт) и Минской ТЭЦ-4 (2 по 2,5 МВт).

Для расширения круга объектов, допускающих утилизацию энергии сжатого газа, необходимы установки малой мощности, предназначенные для работы на ГРС и ГРП с малыми расходами газа.

Некоторые варианты подобных установок приведены ниже:

1. Детандер-генераторная установка ДГУ-8-380-Т-У1 мощностью 8 кВт при частоте вращения 3000 об/мин предназначена для автономного электроснабжения ГРС выпускается харьковским ОДО «Турбогаз».

2. Турбогенератор типа ТСКЗ, производимый НПП «Газэлектроприбор» г. Харьков мощностью 1-30 кВт, предназначен для автономного электроснабжения ГРП, станций катодной защиты трубопроводов, систем автоматики (рисунок 1). Турбогенератор состоит из герметичной капсулы, внутри которой на валу генератора установлена одноступенчатая турбина. Агрегат устанавливается параллельно регулятору давления газа.

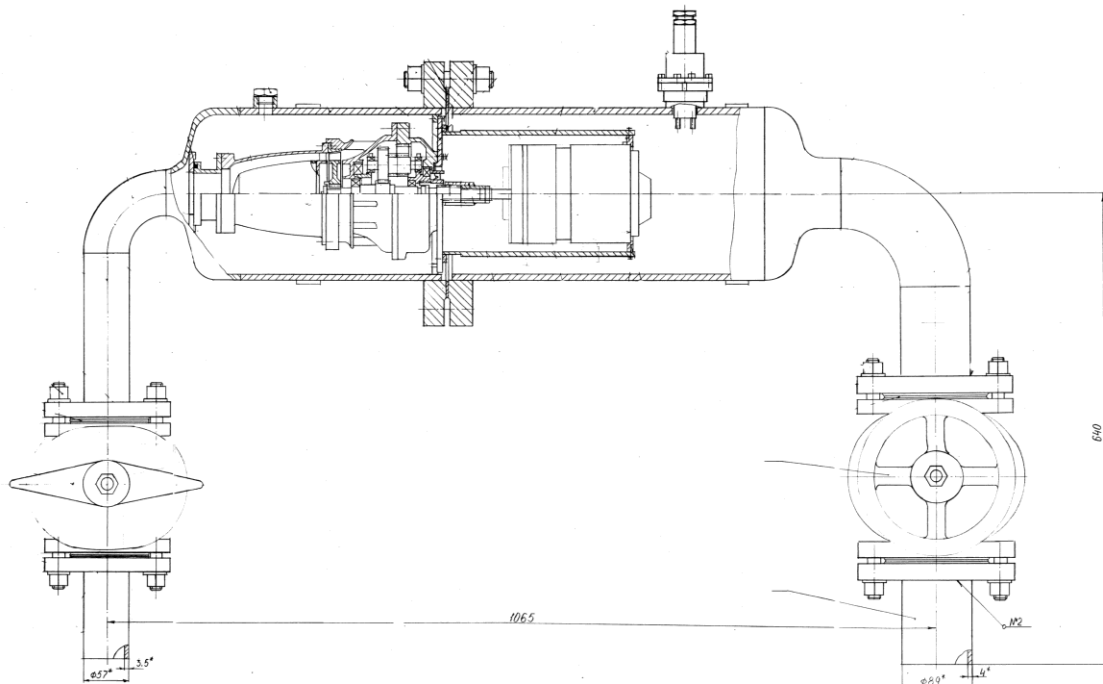


Рисунок 1 – Турбогенератор типа ТСКЗ

3. Чешская компания «Gascontrol» выпускает установки мощностью 11-15 кВт, вплоть до 100 Вт аналогичной конструкции.

4. Турбодетандерные установка типа ПЭГА мощностью 100 -600 кВт, разработанные фирмой «Автогазсистема-Бис» (Россия), применяются для производства холода для промышленных холодильников.

В результате преобразования энергии сжатого газа в работу в ходе адиабатного расширения происходит снижение температуры газа: порядка  $10^{\circ}\text{C}$  на шаг ступени снижения давления в 0,1 МПа. При низкой температуре некоторые компоненты, составляющие смесь «природный газ» изменяют свое содержание в потоке газа, а избыточное количество в ином агрегатном состоянии выделяется в поток. При охлаждении ниже температуры точки росы избыточная влага выделяется в жидкой или твердой фазах. Тяжелые углеводороды, например, пропан-бутановые фракции, в соответствии с изотермой равновесия частично переходят в жидкое состояние. В результате образуется смесь подобие снежной массы, которая негативно воздействует на проточную часть турбины, с одной стороны, увеличивает необратимые потери изменяя геометрические характеристики направляющего аппарата, с другой — снижает надежность работы установки из-за возможности ускоренного разрушения рабочих лопаток. Кроме того, по нормам, природный газ должен поступать потребителю с температурой не ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ . Поэтому его необходимо подогревать до или после турбогенератора, о чем говорилось выше. В существующих утилизационных турбоустановках газ либо не подогревается, что связано с небольшим теплоперепадом, срабатываемом в них, либо подогревается водой с температурой  $70 - 130^{\circ}\text{C}$ . Нагрев природного газа, в свою очередь, зависит от срабатываемого теплоперепада и начальной температуры потока газа. В последнем случае могут возникнуть проблемы с обеспечением установки требуемым теплоносителем.

Для устранения этих недостатков целесообразно рассмотреть возможность применения многоступенчатого расширения потока газа с промежуточным подводом теплоты после каждой ступени, что, с одной стороны, приближает процесс к изотермическому, с другой — увеличивает работу процесса. При этом тепловой перепад, срабатываемый на каждой ступени снижается пропорционально числу ступеней расширения, в связи с чем снижается и теплота, требуемая для возврата температуры потока газа к начальному значению после расширения в каждой ступени, что позволяет рассмотреть использование в тех же теплообменниках более доступного теплоносителя, например, использование оборотной воды и пр. Очевидно, что стоимость и площадь для размещения оказывается такой установки в несколько раз больше простейшей установки с одноступенчатой схемой, что оказывается малопривлекательным.

Многоступенчатая схема с несколькими расширительными машинами и теплообменниками возможна, но ее необходимо реализовывать с учетом указанных ограничений. Подобным образом поступили в концерне «Atlas Copco», где создали турбодетандерную установку производительностью от 0,5 до 20 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ . В ней от 2-х до 6-ти радиальных высокооборотных ступеней расширения вращают общий вал редуктора и далее генератор. Подогрев газа осуществляется после каждой ступени в выносных теплообменниках.

Для Республики Беларусь следует рассмотреть возможность внедрения подобных установок малой мощности, ежегодный энергосберегающий потенциал которых эквивалентен расходу до 400 млн. кубометров природного газа, требуемого на выработку до 1,5 млрд. киловатт-часов электроэнергии. Это эквивалентно 80 миллионам долларов США при цене \$210 за тысячу куб. метров природного газа,

которая установлена Республике Беларусь в 2009 году. В этой связи возникает задача разработки и создания компактной, тихоходной, многоступенчатой турбины, снимающей обозначенные выше проблемы. Разработка такого варианта многоступенчатой турбины ведется в Белорусском национальном техническом университете.

УДК 621.1

**Беспламенное окисление. Горение с низким образованием  $NO_x$  также при сильном предварительном подогреве воздуха для горения.**

Македон Н. Е.

Научный руководитель Ярмольчик Ю. П., к.т.н., доцент

При беспламенном окислении газообразное топливо преобразуется невидимо и без обычного шума пламени. Это связано с отсутствием температурных пиков во фронте пламени, также становится возможным дальнейшее подавление температурного образования  $NO_x$  при более высоком предварительном подогреве воздуха.

Самым распространенным способом преобразования энергии из химически связанного состояния является сжигание в технических устройствах. Образующееся при сгорании тепло применяется, например, для нагрева промышленных печей, для получения технического пара или же для выработки механической или же электрической энергии. При горении образуются углерод, водород или их самые различные соединения, по возможности, полностью окисленные до углекислого газа и водяного пара. Необходимый для реакции кислород берется в основном из воздуха, где его содержание около 21%. Остальная часть воздуха - это в основном азот, который при горении рассматривается как инертный газ. Определение «инертный газ» действительно, однако, только для энергетической картины. При высоких температурах реагирует часть азота со свободными атомами по механизму Целдовича до окиси азота. Этот процесс определяется также как термическое образование окиси азота, поскольку реакция сильно зависит от температуры.

Существенное образование термического  $NO_x$  начинается от около 1600°C и очень сильно растёт с ростом температуры. Адиабатная температура горения обычного топлива достигает при использовании воздуха около 2000°C и соответственно повышается при предварительном подогреве воздуха для горения. Это ведет к тому, что в процессе горения, еще до введения граничных значений на допустимые выбросы, необходимо предпринять меры к снижению образования  $NO_x$ .

Принцип беспламенного окисления опирается на предварительное смешивание газов горения с инертными газами в таком соотношении, что даже при высоком предварительном подогреве воздуха можно избежать таких больших температурных пиков, как во фронте пламени. На рисунке 1 показаны максимальные температуры реакции смеси топливо/воздух/отходящие газы в зависимости от температуры предварительного подогрева воздуха.  $K_v$  обозначает при этом отношение рециркулируемого массового потока к сумме массовых потоков газообразного топлива и воздуха. Смесь перед реакцией полностью молекулярная. Температура в пространстве горения достигает 1000°C и соответствует температуре рециркулируемых отходящих газов. При  $K_v = 0$ , что соответствует отсутствию рециркуляции отходящих дымовых газов, проистекает адиабатная температура горения около 2000°C, при чем по определению не учитывается диссоциация продуктов горения. Эта температура растет при повышении температуры предварительного подогрева воздуха. При этом было принята упрощенно постоянная специфическая способность поглощения тепла продуктами горения как не зависящая от температуры. Пунктирные линии обозначают реальное изменение температур, при этом принимается во внимание диссоциация продуктов горения. Уже при самой малой рециркуляции отходящих газов ( $K_v = 0,3$ ) можно заметить существенное снижение максимальных температур. При высоких температурах горения они лежат всё еще значительно выше 1600°C, так что при температурах предварительного подогрева воздуха для горения более 600°C даже при



использовании технологий снижения  $NO_x$  приходится считаться с высокими выбросами. При более высоких соотношениях предварительного смешивания максимальные температуры горения существенно снижаются и возрастают независимо от температуры предварительного подогрева воздуха. Однако горение не происходит при любом составе предварительной смеси. Если при горении со стабильным пламенем подмешивать в воздух для горения инертный газ, горение происходит стабильно лишь до определенной степени. Как только эти границы пересекаются, пламя становится нестабильным, обрывается и, в конце концов, гаснет. Также при высоких температурах горения это может привести к воспламенению в пространстве печи и ведет к неполному сгоранию, поэтому состояние нестабильного горения в любом случае необходимо избегать. Тем не менее, было показано, что при дальнейшем увеличении скорости рециркуляции отходящих газов, при определенных условиях, опять можно достигнуть стабильного состояния. При этом газообразное топливо невидимо и бесшумно полностью реагирует и поэтому этот способ горения называется «беспламенное окисление».

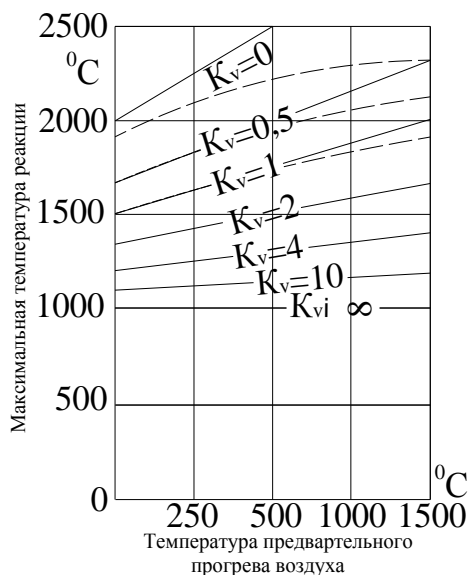


Рисунок 1 – Максимальная температура реакции

Способ горения называемый «беспламенное окисление» может широко использоваться в сфере энергетики и применяться на различных типах горелочных устройств. Например: горелка с внешним подогревом воздуха – для достижения необходимого предварительного смешивания может использовать венцеобразное расположение воздушных сопел. При этом с высокой скоростью поступающие турбулентные свободные струи засасывают отходящие газы из пространства горения, перед тем как произойдет реакция между газообразным топливом и кислородом. Таким образом самая высокая достигаемая локальная температура в реакционной зоне при 5-ти разовом предварительном смешивании и температуре в печи 1000°C всего лишь 1400°C даже тогда, когда воздух для горения подогревается до температуры в пространстве горения. На рисунке 2 показана схематически горелка, которая разработана для работы с воздухом для горения, подогрев которого производится отдельно. Второй подвод воздуха делает возможным работу в режиме пламя, до тех пор, пока в печи не будет достигнута температура, необходимая для режима «беспламенного окисления». Такая горелка имеет большой запас до разрешенной для многих применений границы в 500

$\text{mg}_{\text{NO}}/\text{m}^3$  (с учетом 5%  $\text{O}_2$  в отходящих газах) даже при очень сильно подогретом воздухе.

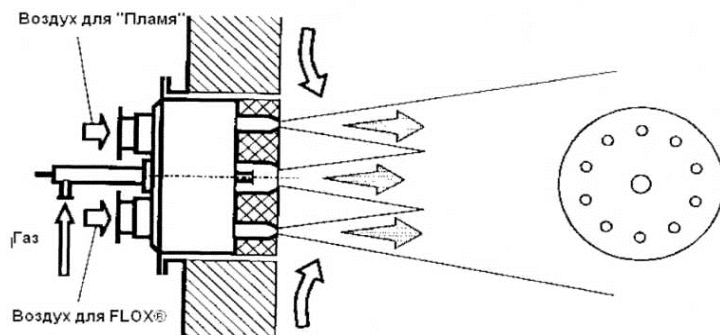


Рисунок 2 – Горелка для «беспламенного окисления» с внешним подогревом воздуха

- *рекуперативная горелка* – можно использовать для прямого и непрямого (косвенного) нагрева промышленных печей, в основном при применении природного и сжиженного газов. Горелка оборудована комплектным блоком управления, что позволяет моделировать систему нагрева печи отдельными самостоятельными блоками мощностью до 250 кВт. Предпочтительным является регулирование по принципу «Вкл./Выкл.», которое соответствует современной цифровой технике управления. Принцип беспламенного окисления применим для рекуперативных горелок. На рисунке 3 показана рекуперативная горелка для «беспламенного окисления». Рекуперативная горелка может быть оптимизирована таким образом, что возможно достижение практически нулевых выбросов. В результате натурных испытаний были получены следующие измерения:

топливо:	природный газ;
температура печи:	1000°C;
КПД:	> 80%;
$\text{NO}_x$ в отходящих газах:	5 $\text{mg}_{\text{NO}}/\text{m}^3$ (с учетом 5% $\text{O}_2$ в отходящих газах).

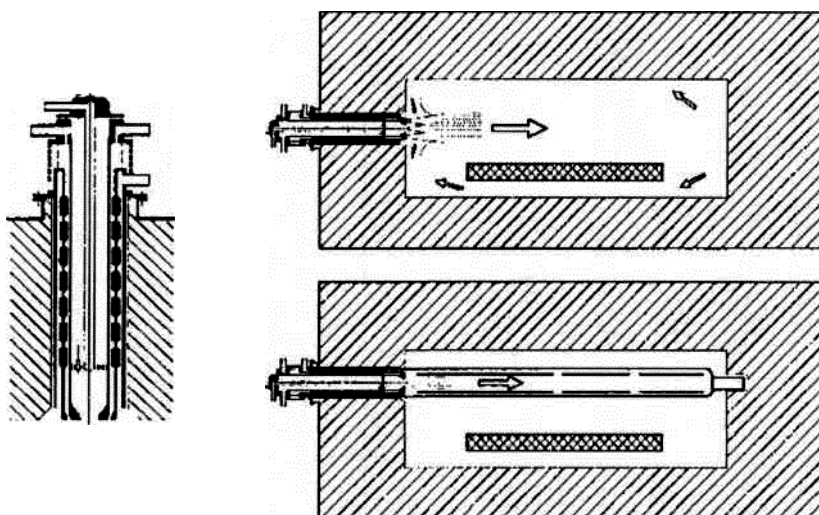


Рисунок 3 – Рекуперативная горелка «беспламенного окисления» для прямого и непрямого нагрева

- *регенерационная горелка* – основана на существенном увеличении поверхности теплопередачи. В конструкции регенерационной горелки предусмотрены переключающие клапаны на холодной стороне горелки. Таким образом, достигается высокий теплотехнический КПД даже при высоких температурах процессов в печи. Показанная на рисунке 4 конструкция горелки позволяет в полной мере использовать принцип беспламенного окисления. Регенерационные патроны расположены короннообразно вокруг центральной трубки подачи газа и пропускают через себя попеременно то воздух для горения (в печь), то отходящие газы (в общий коллектор). С регенерационной горелкой были получены следующие результаты измерения:

топливо:	природный газ;
температура печи:	1200°C;
КПД:	> 77-81%;
NO <sub>x</sub> в отходящих газах:	от 86 до 107 мг <sub>NO</sub> /м <sup>3</sup> (с учетом 5% O <sub>2</sub> в отходящих газах).

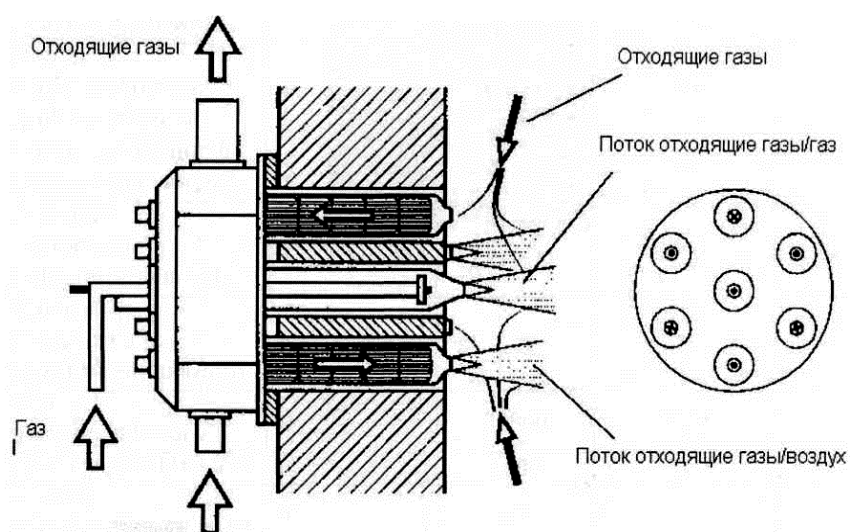


Рисунок 4 – Регенерационная горелка «беспламенного окисления»

Таким образом, в результате исследований принципиально нового способа горения – «беспламенного окисления» - были получены удовлетворительные результаты по КПД для низкотемпературных процессов (до 1200°C) со значительным (до абсолютного) снижением выбросов оксидов азота, что подтверждает перспективность такого способа, учитывая всё более жёсткие ограничения по объёмам вредных выбросов в промышленности.

УДК 621.137

**Тепловые насосы – основа теплоснабжения будущего**

Михаленок Е. Е.

Научный руководитель Сапун Н.Н. к.т.н., доцент

Тепловые насосы известны уже без малого 200 лет, а истинный интерес и массовое применение этого объекта появился немногим более 25 лет назад. Теоретические основы работы тепловых насосов были изложены в 1824 году при публикации «Цикла Карно». Уже через 30 лет, в 1852 г. Вильям Томсон, а в последующем лорд Кельвин, создает «Умножитель тепла» - первый тепловой насос, работающий на эффекте охлаждения воздуха при расширении и нагрева при сжатии, вызвавший настоящий фурор на Парижской выставке. Первая крупная теплонасосная установка для отопления здания местного самоуправления начинает функционировать в Цюрихе в 1938 г, где в качестве источника тепла для установки была выбрана вода местной реки. В дальнейшем массовое производство и применение тепловых насосов сдерживалось высокой стоимостью технологии производства и относительно низкими ценами на энергоносители. Положение изменил энергетический кризис 70-ых годов, увеличивший выпуск установок в 3-4 раза. В СССР первая теплонасосная установка начинает работать для теплоснабжения пансионата «Дружба» (Крым) в 1981 г.

Принцип работы теплового насоса аналогичен принципу работы холодильной машины, однако в случае теплового насоса, используется теплота низкопотенциального источника, например окружающей среды. Рабочее тело - жидкий хладагент поглощает тепло, поступающее из окружающей среды. Образовавшийся при испарении хладагента пар (газ) повышенного давления всасывается в компрессор. При сжатии выделяется тепло в таком же количестве, в котором оно было поглощено хладагентом при испарении. Нагретый и сжатый газ поступает в конденсатор. При конденсации газ превращается в жидкость, выделяя при этом тепло которое, передается воде, циркулирующей по отдельной системе отопительного (технологического) контура. Далее хладагент возвращается в испаритель. Рабочий цикл замыкается.

Аналогом КПД для тепловых насосов является понятие коэффициент эффективности (COP) – отношения количества тепловой энергии, полученной в цикле к количеству электроэнергии затраченной на привод компрессора. В зависимости от различных факторов, в том числе от типа хладагента и температурного потенциала окружающей среды, COP может принимать значения от 3 до 6.

Для работы системы необходимо иметь источник и потребитель теплоты. В качестве источника, на сегодняшний день можно использовать потенциал всех четырех стихий. В первую очередь это энергия воздуха, энергия отработанных технологических и дымовых газов. Если источником тепла является окружающий здание воздух, тепловой насос эффективно работает при температуре воздуха не ниже  $-15^{\circ}\text{C}$ . Интересным вариантом использования теплового насоса может быть применения его для регенерации тепла воздуха хлевов, конюшен, промышленных помещений, холодильных установок. Существуют схемы использования тепловых насосов для обогрева помещений одновременно с холодоснабжением промышленных холодильных установок.

Не менее широко используется как в промышленности, так и в быту энергетический потенциал водных ресурсов: озер, рек, подземных и сточных вод. Например, грунтовая вода является идеальным источником тепла для теплового насоса, так как в течение года она сохраняет постоянную температуру  $+(8..10)^{\circ}\text{C}$ . Крупные озера, подрусловые воды рек являются мощнейшими аккумуляторами

низкопотенциальной теплоты, преобразовать и использовать которую можно при помощи теплонасосных установок. Тепловой потенциал в стоячей воде не превышает 30 Вт/м.п. теплообменника, при ускорении потока наблюдается существенная интенсификация теплообмена.

В случае, когда источником тепла является почва, на глубине до двух метров укладывают плоский коллектор. Ориентировочно площадь такого коллектора принимается в два раза больше, чем площадь отапливаемого здания. Также, при отсутствии свободной площадки для заглубления коллектора, возможен забор тепла из почвы через вертикальный зонд. В этом случае теплообменники погружают в скважину глубиной до 100 м. Тепловой потенциал грунта при горизонтальной конфигурации теплообменника составляет 25 Вт/м.п., при вертикальной конфигурации – 50 Вт/м.п.

При проектировании систем отопления с применением тепловых насосов, нужно учитывать не только особенности теплового источника, но и характеристики отапливаемого здания. Тепловая потребность отапливаемого здания рассчитывается с учетом теплопотерь на квадратный метр площади. Обычно она составляет для плохо утепленных зданий 80-100 Вт/м<sup>2</sup>; для хорошо утепленного здания 50 Вт/м<sup>2</sup>.

Расчет тепловой потребности производится для самой низкой годовой температуры данной климатической зоны, в нашем случае температура января (-24°C) и с условием, что отапливаются все помещения дома. Исходя из этого, рассчитывается мощность теплового насоса и параметры системы забора тепла. Из-за отсутствия опыта эксплуатации подобных установок в Беларуси, совместно с тепловым насосом необходима установка резервного источника теплоснабжения – встроенные в контур системы электроводонагреватели, твердотопливные газогенераторные котлы.

Особого подхода требует и система отопления. Наиболее пригодными для отопления коттеджа или загородного дома с точки зрения теплового насоса являются теплые полы и стены. Эффективность теплового насоса находится в обратно пропорциональной зависимости от температуры в системе отопления. Чем ниже эта температура, тем выше эффективность теплового насоса. Кроме того, у большинства отопительных тепловых насосов максимальная температура подающего трубопровода колеблется от 55 до 60°C. Такая температура обеспечивает равномерный прогрев помещения тепловым излучением, которое является для человека более приятным, чем конвенциональное тепло, идущее от настенных радиаторов.

При рассмотрении мирового применения тепловых насосов, неоспоримым лидером в этой сфере является США с установленной мощностью теплонасосных систем 4800 МВт. Далее следуют такие страны как Швейцария, Германия, Швеция, Канада с установленной мощностью 400-500 МВт. Так, например, теплоснабжение Стокгольма осуществляется с помощью тепловых насосов перекачивающих тепло из вод Балтийского моря с температурой +8°C. В Германии государство датирует установку теплового насоса в размере 50% а также льготные тарифы на электрическую энергию.

В Беларуси данные технологии не имеют такого массового применения, однако имеются интересные и показательные объекты, как например использование тепла вытяжного воздуха трансформаторных залов на станциях метро «Пролетарская» и «Тракторный завод». Потребитель утилизированной теплоты – система отопления служебных помещений станций метро. Также тепловые насосы применены на подстанции "Светлогорск" Речицких электрических сетей. Тепловой источник – нагретое трансформаторное масло. Имеются примеры утилизации тепла сточных вод на очистных сооружениях и канализационных насосных станциях Минска, Гомеля. К сожалению, остались нереализованными проекты теплоснабжения исторического центра «Мирский замок» с использованием теплоты местного водоема,

теплоснабжения кафе «Жар-птица» в Минском парке Горького с использованием теплоты подрусловой воды реки Свислочь.

Таким образом, можно отметить, что тепловые насосы являются ресурсосберегающими теплоисточниками с неоспоримым технологическим, экологическим и экономическим эффектом, применение которых – дело недалекого будущего.

#### Литература

1. [www.heatpumpcentre.org](http://www.heatpumpcentre.org)
2. Журнал «Энергоэффективность» 8/98 ст. 14-16; 9/98 ст. 9-11; 11/98 ст. 16-18
3. Информация по проектированию. Электрические тепловые насосы GeoTherm 214 ст. Vaillant – 2007.

УДК 620.92:579.66

## **Энергетические плантации биомассы – новые тенденции в лесоводстве и земледелии**

Шишпар С.Г.

Научный руководитель к. т. н, доцент Лосюк Ю.А.

Наблюдающаяся тенденция в мире – постепенное истощение ископаемых энергоресурсов, таких как нефть, газ, уголь, на которых в настоящее время базируется мировая энергетика, автомобильный, морской, железнодорожный транспорт и авиация, жилищно-коммунальное хозяйство и другие отрасли экономики, постепенно оказывает влияние на структуру лесоводства и земледелия.

Наряду с выращиванием технических и продовольственных культур начинают появляться энергетические, т.е. такие, которые могут быть использованы в качестве топлива либо для производства его различных видов: жидких и газообразных. Они объединяются единым термином – биомасса.

Рост продуктивности пахотных земель и возможность увеличения выхода биомассы в лесных угодьях при современных способах их возделывания с применением удобрений и искусственного полива позволяют многим странам выделять значительные территории для организации энергетических хозяйств. Для них можно использовать не только пашню, но и различные бросовые земли, не входившие в структуру пахотных.

От первых экспериментов в США с выращиванием быстрорастущих пород деревьев для энергетических целей в начале 80-х годов прошлого столетия многие страны переходят к систематическому культивированию подобных растений в значительных масштабах.

Крупнейший в мире производитель биотоплива – этанола Бразилия, выращивает исходное сырье – сахарный тростник на 5,5 млн. га и намерена расширить посевы еще до 8,1 млн. га [1]. Она может предоставить без ущерба обезлесивания порядка 58-148 млн. га земель для выращивания сахарного тростника и других растений, используемых для выработки энергии или производства топлива [2].

Кстати, на ее территории действует ТЭЦ мощностью до 30 МВт, топливом для которой служит древесина с плантации эвкалипта, занимающей 3000 га. Древесина измельчается, затем газифицируется, а генераторный газ сжигается в котельном агрегате.

Большая территория, до 27 млн. га в Индонезии может быть отведена под посадки масличной пальмы для извлечения масла и дальнейшей переработки в биодизельное топливо.

США имеют возможность выращивать энергетические культуры на площади 77 млн. га. Россия в конце XX века не использовала более 15 млн. га пахотных земель. Украина имеет потенциал в 27 млн. га для производства энергетической биомассы. Европейский Союз к 2000 году имел порядка 20 млн. га сельскохозяйственных площадей и 20 млн. га бросовых земель, на которых возможна организация энергетических хозяйств. Уже к 2003 году часть этих земель (7 млн. га) была занята посевами масличного рапса. В перспективе будут засеяны 12 млн. га [3].

Колумбия, подобно Бразилии, расширяет плантации сахарного тростника. Там на площади 150 000 га выращивается урожай, из которого ежегодно производится 730-912 тыс. м<sup>3</sup> этанола для транспортных целей [4].

В Швеции посадки ивы разбиты на 14000 га заболоченных земель [5]. Древесина убирается 1 раз в 2 года. Такая периодичность связана с тем, что после первого года ива

срезается на уровне земли и впоследствии начинает куститься, значительно увеличивая биомассу. Уборка производится комбайнами в зимнее время, когда болота замерзают. Предусмотрено функционирование плантации в течение 25 лет.

Есть примеры, когда вместо продовольственных культур выращивается энергетическая биомасса. Так, в некоторых фермерских хозяйствах Германии, имеющих пахотные земли в 2900 га, перестали выращивать квотируемую сельскохозяйственную продукцию и начали культивировать урожайную «слоновую» траву, которую затем продают для сжигания на ближайшей ТЭЦ.

В земле Гессен (Германия) в ближайшее время будут построены 5 биогазовых установок мощностью по 500 кВт каждая. Одна установка утилизирует ежегодно 10 тыс. тонн кукурузного силоса, который выращивается на площади 200 га. Всего на эти цели предлагается засеять 3600 га пустырных земель, и хозяева этой территории согласились поставлять сырье энергетикам [6].

Великобритания отвела 125 тыс. га для выращивания в течение 6 лет быстрорастущих пород ивы и тополя с последующей утилизацией в топках электростанций.

До 2 млн. га для выращивания биомассы отведет Украина к 2010 г. [7].

**Культуры энергетических плантаций.** Выращенная на энергетических плантациях биомасса представляет концентрированную солнечную энергию, которая может быть трансформирована в тепловую различными путями: при непосредственном сжигании в топках котельных агрегатов, путем дальнейшей конверсии в жидкое или газообразное топливо для генерирования электроэнергии или использования на транспорте. В соответствии с последующим использованием выбираются сорта растений.

Так, в качестве древесных пород используются быстрорастущий тополь, ива, сосна ладанная. Эти породы хорошо растут в умеренном климате. При подкормке удобрениями и регулярном поливе в период выращивания они способны дать 12-22 т/га сухой массы, т.е. в 4-5 раз больше, чем дают обычные леса. [8]

Еще большей урожайностью характеризуется камыш, который позволяет собирать до 40 т органики с гектара.

Для выработки биодизельного топлива с предварительной газификацией исходного продукта используется высокопродуктивная культура мискантус (*miscanthus*). Это многолетнее травянистое злаковое растение с четырехметровым стеблем. Растет в районах возделывания кукурузы и сои, но менее трудоемкое, чем они. Урожайность мискантуса в три раза превосходит урожайность других биодизельных культур. Немецкая фирма *Choren* связывает большие надежды с переработкой этого растения. Оно выращивается и в некоторых штатах США для непосредственного сжигания в котлах [9].

Для тропического климата больше подходит высокопродуктивный эвкалипт.

Вторую группу растений для энергетических плантаций составляют сахаро- и крахмалосодержащие. Этанол, получаемый из них путем аэробного сбраживания, широко используется в качестве 10-22% добавки к бензину для автомобилей. К этой группе в первую очередь можно отнести сахарный тростник. Из него получают основной продукт – сахар, а побочный – патока, содержащая до 45% сахара. Эта простая форма сахара легко ферментируется с помощью дрожжей в этанол. Операция дистилляции, по завершению которой содержание этанола достигает 95%, требует подвода теплоты. Для этой цели сжигается жом сахарного тростника. Он удешевляет конечный продукт – этанол.



Этанол из сахарной свеклы оказывается несколько дороже, чем из сахарного тростника. Причина в том, что переработка свеклы дает очень мало жома и на дистилляцию приходится расходовать традиционные энергоносители.

Сахарное сорго – это культура, которая имеет неполегающие стебли высотой до 2 м и содержит сахарозы в соке 18-22%, т.е. больше, чем в сахарной свекле (16-17%). Отличается высокой урожайностью – 30-50 т/га. Однако выращивается в значительно меньших масштабах.

Хорошо растет в средних широтах топинамбур (земляная груша). Урожайность зеленой массы составляет 80-100 т/га, а клубней 20-60 т/га. Клубни отличаются высоким содержанием углеводов, превышающее их количество в сахарной свекле и тростнике. Выход этанола из клубней в 1,5-2,5 раза больше, чем из сахарной свеклы.

Крахмалосодержащие корнеплоды (картофель) и зерновые (пшеница, кукуруза) состоят из более сложных молекул. Перед сбраживанием их необходимо подвергнуть дополнительной обработке с целью разбить карбогидраты сложных молекул до более простых сахаров. Углеродные связи в крахмале разрушаются ферментами солода или ферментами подходящих плесеней. Этот дополнительный процесс несколько удорожает технологию производства этанола [10].

Древесная целлюлоза также может перерабатываться в этанол при наличии предварительной подготовки. На этой стадии сырье должно измельчаться и подвергаться гидролизу при нагреве с помощью сильных кислот и щелочей.

Третья группа растений объединяет такие виды, плоды или семена которых содержат большое количество масла. Среди них – озимый рапс, содержащий в семенах до 40-44% масла. Его средняя урожайность составляет 2,5-3 т/га. На Северном Кавказе максимальная урожайность достигала 4,7 т/га.

На Филиппинах для энергетических целей используется кора кокосовых орехов, а в США и Южно-Африканской Республике – соевые бобы [11].

Среди перспективных культур, выращиваемых на энергетических плантациях можно выделить древесную – ятрофа (*Jatropha*). Она произрастает в относительно засушливых районах, ни малопригодных для сельского хозяйства землях. Плоды этого дерева несъедобны, отличаются большим содержанием масла.

В Мозамбике уже засажены первые плантации этих деревьев на площади 2200 га [12]. Под эту культуру в стране отведено 11 000 га. Масляные орехи *Jatropha* культивируют в некоторых тропических странах: Гане, Мали, Идонезии [13].

Бразилия также намерена выращивать ятрофу, чтобы в дальнейшем производить биодизельное топливо. Древесные плантации займут 48 000 га [14].

**Производство и потребление жидких моторных топлив.** Производство этанола из биомассы достаточно хорошо известно и налажено. Из сахаросодержащих растений 95% этанол получают ферментацией с помощью дрожжей и последующей дистилляцией. Крахмалосодержащие культуры подвергают предварительному гидролизу. Дальнейшая технология не отличается от обычного аэробного сбраживания.

Переработка древесной целлюлозы в этанол непрерывно совершенствуется. Так, швейцарские исследователи несколько лет назад разработали оригинальную технологию [11]. Биомасса подвергается обработке паром для расщепления целлюлозы, затем к ней добавляются грибки и дрожжи для ферментации на этанол. В процессе переработки отделяются волокна, из которых можно вырабатывать изоляционные или связующие материалы. Сепарируется «протеиновая паста», идущая на корм скоту.

Выход этанола из 1 т сухой субстанции составляет 150-200 л, а также получается 400 кг волокон и 200 кг «протеиновой пасты».

Самыми крупными производителями этанола для транспортных целей являются Бразилия и США. Бразилия использует смесь 20% этанола с бензином с 1975 г, а США

добавляют 10% этанола из кукурузы с 1980 г. Статистика производство за последние годы этанола в этих странах выглядит следующим образом (в млн. м<sup>3</sup>/год):

	2001	2002	2003	2004	2005	2010
Бразилия [2]	11,9	16,0				22,4
США [15]		7,92	10,6	12,87	16,65	

В странах Европейского Союза предпочтение отдается биодизельному топливу. По Биотопливной Директиве ЕС предусматривается к 2010 г. заменить биотопливом 5,75% всего потребляемого моторного топлива.

Одна из простейших технологий, разработанная в Республике Беларусь заключается в том, что рапсовое масло, полученное отжимом семян рапса, смешивается в соотношении 75:25 с дизельным топливом. Тем самым уменьшается исходная вязкость рапсового масла.

Более распространенная современная технология получения биодизельного топлива заключается в следующем. К рапсовому маслу добавляется метанол и щелочь. Эта смесь обрабатывается сложными эфирами в этерификационном реакторе. В результате получается метилэфирная кислота (бионефть) и нерафинированный глицерин.

Метилловый эфир промывают водой и сушат при температуре 60<sup>0</sup>С. Готовое дизельное топливо составляет 92% от обрабатываемой смеси. [8]

Республика Беларусь начинает понемногу накапливать опыт в организации биоэнергетических плантаций. В отдельных хозяйствах Гродненской, Витебской и Гомельской областей выращивается рапс с целью дальнейшего получения биодизельного топлива.

В нашей стране есть значительные резервы по расширению энергетических плантаций. Так, по недавно утвержденной Правительством республики Государственной программе «Торф» на 2008-2010 годы и на период до 2020 года предусматривается повторное заболачивание на 150 тыс. га выбывших из эксплуатации торфяных месторождений вместе с осушенными болотами для лесного хозяйства. Эти болотные территории можно было бы использовать для выращивания высокоурожайной ивы и камыша по примеру Швеции и Германии и получать ценный энергетический продукт биомассу.

Расчеты, сделанные еще до значительного подорожания импортируемых энергоносителей из России, подтверждают, что производство биотоплива на энергетических плантациях оказывается экономически целесообразным [16].

Приведенные факты показывают, что в различных странах мира принимаются серьезные меры, направленные на замену ископаемых энергоресурсов жидкими и газообразными видами топлива из биомассы. Для этих целей создаются энергетические плантации и разрабатываются технологии для конверсии биомассы.

#### Литература

1. Biofuelling Brasil. Grand Paul. Refocus 2006, May – June, с. 56,58 – 59.
2. Green or grey? Cameron A. Renewable Energy World. March – April 2007, №2.
3. Биодизельне паливо. Зел. енерг., 2003, №4, с. 9-11.
4. Old fuel for modern times. Domac J., Richards K., Segon V. Renewable Energy World . July - August , 2005, №4.
5. Bio-energy in Europe: changing technology choices Andre P. C. Faaij. Energy Policy, Vol. 34 February, 2006, с. 324.
6. Regeneratives Energiepotenzial verst ä kt nutzen. Fenchel Günter. ew: Elektrizit ä t swirt. 2007. №106, с. 65.

7. Виробництво біопалива в Україні – важливий напрям вирішення енергетичної проблеми і охорони довкілля. Кудрицька Н. В. Залізнич. трансп. України. 2007, №1, с. 36-39.
8. C. Y. Wereko-Brobby, E. B. Hagen. Biomass conversion and technology. London, 1996.
9. Leaders of the pack. Luxmore C. Renewable Energy World 2007.10, №5, с. 72-79.
10. Использование биотоплива в сельскохозяйственной энергетике. Огурлиев А.М., Огурлиева З.А. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001, №2, с. 22-24.
11. Ökostrom aus Gras. Scheffen Wilhelm. Kommunalwirtschaft, 2001, №11, с. 689.
12. Mozambique to develop jatropha for biofuels. Renewable Energy World. May – June, 2007.
13. Energieban installiert Hybrid-Anlage in Tanzania. Sonne Wind und Wärme, 2006. 30, №10. С. 25.
14. Biodiesel plant takes shape. News Renewable Energy World. 2007. 10, №5, с. 20.
15. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy Biomass Program. Ethanol.
16. Эффективное использование биомассы. Падалко Л. П., Гуляев В. Ф. Энергоэффективность, №1,2. с. 16-17, 14-15.

УДК 621.1

## Научные основы организации процессов горения комбинированного многофазного органического топлива в турбулентных потоках

Ярмольчик Н. М.

Научный руководитель Есьман Р. И., д. т. н., профессор

### Введение

В результате интенсивного включения в глобальную экономику стран, в недавнем прошлом имевших автономные рынки как производства, так и потребления, - все более возрастает интерес не только бытовых потребителей, но и крупных промышленных предприятий и целых отраслей в использовании альтернативных видов топлива. Однако сжигание таких видов топлива ограничено рядом технических, технологических, экологических и структурно-социальных факторов. По этим причинам промышленность заинтересована в развитии технологий и разработке эффективных технических устройств для комбинированного сжигания различных видов альтернативного топлива, позволяющих придерживаться высоких требований к современным технологическим процессам – с одной стороны, и к возрастающим экологическим стандартам – с другой стороны.

### 1. Характеристики турбулентных потоков при комбинированном сжигании многофазного топлива

В течениях с горением влияние тангенциальных потоков подаваемого воздуха и топлива направлено на стабилизацию высокоинтенсивных процессов эффективного чистого сгорания.

Экспериментальные исследования показывают, что спиральное движение оказывает существенное влияние на поле течения: на расширение струи, процессы перемешивания и затухания скорости в струе, на размеры, форму и устойчивость факела пламени и, собственно, на интенсивность горения (в случае реагирующих потоков). На все эти характеристики влияет интенсивность окружной компоненты скорости.

$$S = \frac{G_d}{G_x} \left( \frac{d}{2} \right), \quad (1)$$

где величина

$$G_\theta = \int_0^\infty (\rho u \omega + \rho u' \omega') r^2 dr, \quad (2)$$

является потоком момента количества движения в осевом направлении и учитывает вклад  $x - \theta$ -компоненты турбулентного сдвигового напряжения.

### 2. Методология конструкции комбинированного горелочного устройства для сжигания многофазного топлива в турбулентных потоках

#### 2.1 Принципиальная общая схема

Каналы подачи топлива располагаются внутри осевых и тангенциальных каналов подачи воздуха и вокруг стабилизатора (при использовании распыленного топлива, газа и т.п.) или в центре стабилизатора (при использовании жидких видов топлива, альтернативного твердого топлива и газа при подаче с помощью распылителя). Такая схема обеспечивает:

- образование рециклических завихрений у корня факела пламени, которые обеспечивают его абсолютную стабильность даже в холодной топке;

- управление формой факела пламени;
- насыщение факела пламени топливом (за счет аэродинамического захвата);
- создание в центральной части факела пламени условий, способствующих значительному сокращению образования окисей азота.

#### 2.2 Принцип подачи первичного воздуха

Наиболее эффективным представляется использование двух независимых каналов подачи первичного воздуха с регулировкой сечения выходного отверстия.

- Через осевой канал подачи первичного воздуха воздух эффективно подавать на высокой скорости, что обеспечивает узкую направленность потока.
- Через тангенциальный (генерирующий вихревые потоки) канал подачи первичного воздуха воздух эффективно подавать на высокой скорости с завихрением потока.

При этом принцип работы этих двух каналов должен соответствовать следующим условиям:

- Высокая скорость движения воздуха в осевом канале
- Завихрение воздушного потока

#### 2.3 Принципиальная схема сжигания топлива

Горелочное устройство, удовлетворяющее современным условиям, должно работать на следующих видах топлива:

- Твердое топливо - подается дутьевым способом через кольцевой канал, расположенный вокруг центрального стабилизатора;
- Газообразное топливо - впрыскивается через кольцевой газовый канал или газовую форсунку;
- Жидкое топливо - распыляется через форсунки, размещенные по центру горелки;
- Жидкое и/или твердое альтернативное топливо, вводимое через центральную часть горелки;
- Смешанное топливо в любых пропорциях.

#### 2.4 Осевой и тангенциальный потоки воздуха

Воздух, поступающий через осевой канал, создает сильный факел (за счет высокой скорости потока). Канавки улучшают поглощение факелом вторичного воздуха, в то же время кольцевой зазор, ограничивая факел по диаметру (не допуская его отклонения), делает его узким. Воздух, поступающий через тангенциальный канал, обеспечивает изменение вращательного движения потока (завихрение). При усилении завихрения факел становится немного больше по диаметру и смешение топлива с воздухом происходит быстрее.

#### 2.5 Осевые каналы

##### Газовый канал

Газ подается через вихревую форсунку со скоростью приблизительно 300 м/сек.

Изменение сечения выходного отверстия изменяет скорость истечения газа, что позволяет управлять струей газа.

Канал подачи измельченного твердого топлива (угля или нефтяного кокса)  
Измельченный уголь подается узким факелом при помощи соответствующего количества транспортирующего воздуха со скоростью подачи до 35 м/сек, которая оптимизируется в зависимости от характеристик используемого топлива. Эффективнее всего скорость подачи регулировать путем изменения поперечного сечения выходного отверстия.

##### Центральный канал / Стабилизатор

Обычно центральный канал частично закрыт стабилизатором факела, через который проходит незначительное количество воздуха.

Используют разные конструкции стабилизаторов, например, тугоплавкий стальной или керамический диск с многочисленными отверстиями, которые выполняют функцию удержания пламени у поверхности диска.

#### Гильза / гильзы для форсунок

Гильзы позволяют установить форсунки для подачи жидкого топлива или газа для использования при запуске горелки (если основное топливо – трудновоспламеняемое) или в основном процессе (если являются основным топливом).

Гильзы также следует предусмотреть для установки электрода розжига и/или розжиговой горелки, а также топливных инжекционных трубок для распыления альтернативных видов топлива.

### 3. Принципиальная схема регулирования процессов горения многофазного топлива

#### 3.1 Осевой канал

Наиболее эффективным представляется регулировка по оси путем продольного смещения (вперед или назад) осевой внутренней инжекционной трубки на незначительное расстояние (как правило, не более 20 мм). Изменение положения этой трубки изменяет температурный профиль факела.

В положении, когда поперечное сечение кольцевого канала на конце горелки минимально, поток первичного воздуха слегка уменьшен, а поток нагретого вторичного воздуха в факел увеличен, что повышает температуру в корне факела.

В положении, когда поперечное сечение кольцевого канала на конце горелки максимально, максимально увеличен и поток первичного воздуха, который уменьшает диаметр факела.

Слишком низкое давление воздуха в осевом канале даст длинный, ленивый факел, который обычно не пригоден для обеспечения хорошей работы печи или топки.

Слишком высокая температура корня пламени, естественно, сократит срок службы наконечника горелки.

#### 3.2 Тангенциальный канал

Поступление воздуха через тангенциальный канал управляется силой завихрения воздушного потока. Она может регулироваться:

- воздействием на давление тангенциального потока воздуха. Давление тангенциального потока воздуха может быть снижено до 80 мбар манометрического давления с помощью клапана радиального канала подачи воздуха;
- за счет изменения поперечного сечения тангенциального канала путем продольного смещения внутренней завихряющей трубки.

#### Выводы

Для случая турбулентных диффузионных факелов пламени процесс сгорания комбинированного многофазного топлива определяется структурой потока и условиями смешения различных видов топлива и распределенных потоков окислителя. Соотношение подводимого на горение воздуха по осевому и тангенциальному каналам определяет форму факела пламени, его размеры и интенсивность процессов, что позволяет эффективно оптимизировать технологические параметры.

Таким образом, можно утверждать, что многоканальная схема подачи разных видов топлива и организация двух независимых потоков воздуха (осевого и тангенциального) представляется наиболее оптимальной при комбинированном сжигании различных видов органического топлива.

УДК 621.311.24

**Развитие ветроэнергетических установок мегаваттного класса**

Лукуть А.С.

Научный руководитель Лосюк Ю.А. к.т.н, доцент

В ветроэнергетике последние двадцать лет прослеживается устойчивая тенденция роста единичной мощности ветроагрегатов. Это объясняется несколькими причинами. Эксплуатация десятков тысяч (около 70) установок в мире позволила сделать вывод, что с увеличением масштабов ветродвигателей сокращаются капитальные затраты, т.е. стоимость 1кВт установленной мощности. Большие агрегаты отличаются повышенной удельной выработкой электроэнергии, выраженной в кВт·ч на м<sup>2</sup> площади ометаемой поверхности (площади условного круга, описываемого вращающимися лопастями). Отсюда появляется возможность замены ранее установленных маломощных ветродвигателей на современные, мощность которых достигает 1000 – 6000 кВт. А в проекте предусматривается даже увеличение мощности установки с горизонтальной осью вращения до 7500 кВт с ветроколесом диаметром до 150м.

Подобная тенденция хорошо подтверждается практикой немецкой ветроэнергетики. Так, в Германии в 1990-х годах XX века средняя мощность установленных ветроагрегатов составляла 300 кВт. К 2000г. она выросла до 600 кВт. В 2005-2006г. немецкие компании предпочитают устанавливать машины, превышающие по мощности 2-3 МВт [1]. Естественно, количество установленных агрегатов на тех же площадях сокращается приблизительно на одну треть. Отработавшие 10-15 лет ветроустановки не выбрасываются, а снимаются с фундаментов и продаются в другие страны, например, в Индию, Китай, Испанию, где могут еще работать в течение 10-15 лет.

Увеличение удельной выработки машинами мегаваттного класса объясняется с точки зрения аэродинамики. Мощность ветроагрегата описывается следующим уравнением:

$$P = C_p \frac{\pi V^3 R^2}{2}, \text{ Вт,}$$

где  $C_p$  – коэффициент мощности;  $V$  – скорость набегающего потока, м/с;  $R$  – радиус ветроколеса, м.

Понятно, что при одном и том же продольном профиле лопасти выработка электроэнергии зависит от длины лопасти.

Важнейшим фактором эффективной работы ветроагрегата является скорость потока в месте установки машины. По метеорологическим данным, скорость ветра возрастает с увеличением высоты по закону:

$$V = V_1 \left( \frac{H}{H_1} \right)^{0,14}, \text{ м/с,}$$

где  $V_1$  – скорость потока на высоте  $H_1=10$ м;  $H$  – высота оси ветроагрегата от поверхности земли, м.

Для установок мегаваттного класса соотношение между диаметром ветроколеса  $D$  и высотой его установки  $H$  выражается следующим образом [2]:

$$D \approx H.$$

Иначе говоря, большие ветроколеса будут работать в скоростном воздушном потоке. В обычной практике установки мегаваттного класса размещаются на стальных или комбинированных (сталь – железобетон) башнях высотой 90 – 100 м. Немецкие фирмы предлагают выпускать башни более высокие – до 140 – 160 м. Это позволит увеличить выработку электроэнергии приблизительно на 45% [3].

Американские исследователи [4] изготовили экспериментальную облегченную башню с применением композиционных материалов высотой в 180 м.

Естественно, подобные многотонные конструкции потребовали создавать усиленные фундаменты. Так, например, для установки фирмы Enercon E 112 фундамент имеет размеры: диаметр 20 м и высоту 15 м. Его объем превышает 1000 м<sup>3</sup>. Для изготовления стальной башни используется листовая сталь толщиной 50 мм, которая изгибается в трубу на специальных мощных станах.

Современные авиационные технологии и материалы применяются при изготовлении лопастей ветроколес. Длина лопастей установок мегаваттного класса изменяется от 30 до 61 м, а их масса колеблется от 8 до 20 т.

Так, например, ветроагрегат фирмы Siemens Wind Power мощностью 2,3 МВт имеет лопасти длиной 45 м и массой 12 т.

ВЭУ Multibrid M5000 (P = 5000 кВт) оснащена лопастями длиной 56,5 м и массой 16,5 т [5]. При длине 52 м лопасти ВЭУ Enercon E 112 (P = 4500 кВт) имеют массу 20 т. Основным материалом для изготовления лопастей служит композит. Это может быть сочетание высокопрочных полимерных волокон (волоконный полиуретан), стекловолокна или стеклоткани, углеродных волокон с эпоксидной смолой и полиэфирными смолами. После послойной укладки волокон или тканей и нанесения скрепляющей эпоксидной смолы производится вакуумирование изделия. Тем самым удаляются мелкие воздушные пузырьки, которые ослабляют конструкцию.

В качестве мультипликатора в трансмиссии, синхронизирующего малую скорость вращения ветроколеса 7 – 10 об/мин и большую скорость вращения якоря генератора, применяются обычные многоступенчатые, массивные передаточные механизмы, с коэффициентами передачи 30 – 150. Но некоторые фирмы в мощных ветроустановках стали использовать двух- и трехступенчатые планетарные передачи. По утверждению разработчиков, в таких передачах снижаются на 30% нагрузки, что обеспечивает более длительную работу ответственных механизмов [6].

Некоторые фирмы, например, Vensys Energy AG (Германия) вообще отказались от встраивания мультипликатора в трансмиссию. Это позволило серьезно облегчить поворотную часть ветроагрегата [7]. Взамен был разработан многополюсный тихоходный электрогенератор с постоянными магнитами до 48 штук. Это новшество позволило поддерживать стабильной требуемую частоту тока. Финские разработчики (фирма Kone-Sampol) для условий порывистого ветра создали гидropередачу, в которой циркулирует масло под высоким давлением для передачи крутящего момента на электрогенератор.

В условиях переменного по скорости и направлению потока воздуха необходимо поддерживать оптимальное положение поворотной части ветроагрегата – вектор скорости потока должен быть направлен по нормали к плоскости вращения ветроколеса.

Для малых и средних по мощности машин такое положение сохраняется с помощью обычного хвоста (флюгера) либо с применением виндроз. Виндроза представляет собой два небольших ветроагрегата, которые располагаются симметрично по бокам корпуса поворотной части. Когда один из поворотных ветроагрегатов затеняется корпусом поворотной части при боковом ветре, то возникает крутящий момент, который разворачивает всю поворотную часть до тех пор, пока оба



ветродвигателя виндрозы не оказываются в одинаковом положении по отношению к набегающему потоку.

Крупные машины мегаваттного класса, имеющие поворотные части массой в 350 – 500 т, оборудуются иной системой настройки на поток. В систему входят датчик скорости и направления ветра – анемоскоп, а также исполнительный механизм – отдельный электропривод, соединенный с шестерней. При возникновении импульса на анемоскопе он передается электродвигателю. Последний включается, и шестерня начинает обегать зубчатый венец, закрепленный в верхней части башни – опоры. Поворот многотонной гондолы продолжается до остановки в оптимальном по отношению к направлению ветра положении.

И наконец, регулировка мощности ветроагрегата. Ветроустановки первых поколений выполнялись с фиксированным положением лопастей. При этом не использовались малые, превышающие номинальную (расчетную) скорости потока.

Современные ветроагрегаты лишены этого недостатка, поэтому используют более широкий диапазон скоростей ветра.

Для этого предусмотрены 2 пути регулирования мощности: путем изменения шага лопастей и при аэродинамическом срыве потока.

По первому варианту лопасть поворачивается, чтобы изменить угол атаки, т.е. угол между направлением потока и хордой – линией в сечении лопасти, соединяющей наиболее удаленные точки сечения.

Ветродвигатели мегаваттного класса оборудуются для этих целей либо рычажным механизмом с гидроприводом, либо шестеренчатым механизмом на каждой лопасти с индивидуальным электроприводом. Работа поворотных механизмов всех лопастей синхронизируется.

Аэродинамическое регулирование мощности достигается постепенным уменьшением площади поперечного сечения лопасти по длине и одновременным относительным закручиванием сечений по спирали. При различной относительной скорости движения сечений лопасти, связанной с расстоянием от корневого сечения, в каждом из них возникает своя подъемная сила из-за различных условий срыва потока. В условиях номинальной скорости вся лопасть работает эффективно. С повышением скорости потока выше расчетной, часть лопасти начинает работать со срывом потока, что уменьшает подъемную силу лопасти, и, следовательно, мощность ветроагрегата.

#### Литература

1. A2 SEA errichtet Thanet Offshore. Wind Kraft J. and Natur Energien. 2007.27, №5, с.61. Нем.
2. A plan for action in Europe: Wind energy-the facts. European Commission. 1999.
3. Iken J. Sonne Wind and Warne. 2007.31, №1, с.96,98. Нем.
4. Lightweight composite material could triple wind tower height. Power Eng. 2002.106, №8, с.15. Англ.
5. Up, up and away. Eige de Vries. Renewable Energy World. 2005. July-August.
6. Siemens Wind Power A/S. Wind Kraft J. and Natur Energien. 2005, Прил., с.36-39. Парал. нем., англ.
7. Wind innovation-the ingenious is always simple. De Vries E. Renewable Energy World. 2007.10, №6, с.68,70,72,74-75. Англ.