УДК 621.181:621.048

РАЗРАБОТКА И ПРИНЦИПЫ ОПЫТНОГО ВНЕДРЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ НОВОГО ТИПА НА РАЗНОМ ТОПЛИВЕ

Костюнин В.В., Потапов В.Н., Жарков Г.В., Романов Н.О., Меньшиков А.А.

ООО "ВГС", Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Разработан новый тип вихревых газогенераторов стадийной переработки разной органики в едином, управляемом вихре. Особенности вихря зависят от исходного сырья и использования газа. Выделены базовые решения газогенераторов с вертикальной и горизонтальной осями для управления атмосферой и температурой в вихре. На моделях с горением и на реальных установках проверена возможность их коммерческого внедрения на биомассе и местных топливах, в обычных и новых типах тепловых электростанций с отпуском части энергии даже при кратковременных остановах ее основных агрегатов.

ВВЕДЕНИЕ

Вихревые технологии сжигания и газогенерации твердых топлив и биомассы имеют преимущества. Особо отметим увеличение на 1-2 порядка времени пребывания топлив в разных стадиях процесса с управляемой средой и температурой, необходимых при работе на нестабильном или полидисперсном сырье. Отметим и возможность сепарации твердой негорючей смеси в определенных зонах процесса, при ее переработке. Речь идет только о сильно закрученных потоках (вихрях), в которых интенсивность крутки выше уровня, нужного для сохранения в вихре у оси вращения встречного движения или приосевого обратного тока. При этом создаются условия, когда в разных зонах вихря может происходить усиление или ослабление перемешивания рабочих сред. Эти процессы вызваны изменением интенсивности и направленности турбулентного переноса, и связаны сложным образом со структурой вихря. Пока нет универсальной модели описания этих процессов в неизотермическом, двухфазном вихре с горением. Другой, пока неразрешимой проблемой вихревых аппаратов является дефицит средств эффективного технологического влияния на основные процессы в горящем двухфазном вихре. Удовлетворительное решение этой проблемы недоступно для многих авторов вихревых газогенераторов коммерческого назначения и для подобных вихревых устройств.

С другой стороны все аппараты слоевого типа и струйные с одним ходом сред, без задержки в тех или иных зонах процесса, в основном не обладают многими достоинствами вихревых газогенераторов, в том числе разработанного нами, как нам кажется, совершенно нового типа.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ПРИЕМЛЕМО РЕШЕННЫЕ ПРИ СОЗДАНИИ ВИХРЕВЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ НОВОГО ТИПА

Один из авторов текста еще с конца XX века на аппаратах разных типов изучал генерацию газа из биомассы, твердых топлив и отходов, и в 2004 году испытал первый вихревой газогенератор на опиле с вертикальным вихрем. Вихрем этим нужно было управлять для создания коммерческого аппарата. Для этого им были впервые использованы приемы, предложенные ранее другим автором при изучении моделей горелок, циклонов и вихревых камер еще в 70-80-е годы. Часть результатов этих работ ранее уже была опубликована. В этих работах подробно исследовано формирование интенсивного вихря, в основном, в улитках и циклонах. После 2004 года часть этих работ совместными усилиями заново восстановлены, расширены и

© Костюнин В.В., Потапов В.Н., Жарков Г.В., Романов Н.О., Меньшиков А.А.

дополнены, а один из авторов предложил и исследовал около тридцати холодных и горячих (с горением) вихревых камер для газогенераторов и топок, имеющих до шести последовательных камер, через которые проходит единый вихрь. Нами также предложены и горелки для сжигания полученных искусственных газов, а также твердых топлив и биомассы. Попутно нами разработаны и испытаны на моделях эффективные вихревые аппараты для улавливания и сепарации полифракционной взвеси вместе с ее термической и химической переработкой.

В ходе выполнения нами работ по разработке новых вихревых газогенераторов, топок и горелок в основу их анализа было положено уточненное представление вихря. Оно основано не только на обычном анализе профилей скоростей и давлений, но и на анализе распределений в объеме вихря плотностей потоков момента вращения и количества движения, связанных с турбулентной структурой вихря и разных зонах. Плотности этих потоков определялись по компонентам вектора скорости и далее сопоставлялись с оценочными расчетами распределений в вихре турбулентных параметров, правда с использованием тривиальных модельных представлений. Поэтому наш взгляд на вихрь не во всем совпадает с общепринятой моделью вихря, которая делит его на зоны квазипотенциального и квазитвердого вращения. Сопоставление уточненных представлений вихря мы проверили на физических моделях созданных нами аппаратов. Это позволило нам удовлетворительно решить ряд задач, очень важных в создании работоспособных вихревых устройств, пригодных для коммерческого внедрения. Перечислим базовые технологические проблемы для двухфазных вихрей с горением, как с вертикальной, так и горизонтальной осью, которые позволили нам создать вполне работоспособные коммерческие аппараты нового типа.

Для новых аппаратов с вертикальным вихрем мы приемлемо решили четыре задачи. Во-первых, мы устранили обычный занос твердой фазой камерного завихрителя, размешенного внизу аппарата, причем при весьма малых скоростях (3-5 м/с). Во-вторых, снизили несимметричность вихря относительно его оси при выходе из аппарата и устранили провал взвеси в завихритель, при тех же малых скоростях. В третьих, нами была достигнута целенаправленная концентрация и удержание крупных частиц взвеси у боковых стенок верхних камер, а в четвертых, - достигнута концентрация и удержание в отдельной зоне вихря частиц мельчайших фракций (меньше 30-50 мкм). Для этого нами предложена и создана оригинальная вихревая аэродинамическая ловушка этих частиц перед выходом вихря из аппарата.

С другой стороны, для вихревых аппаратов с горизонтальным двухфазным вихрем нами были приемлемо решены следующие задачи:

- во-первых, отработаны приемы удержания взвеси в зоне первичной закрутки всего вихря с поддержанием в камере сравнительно равномерного заполнения ее пристенных зон потоком аэровзвеси;

- во-вторых, отработаны меры устранения отложений взвеси внизу камерного завихрителя на малых скоростях (5-7 м/с) и отработаны средства управления движением и концентрацией взвеси у стенки завихрителя в двух направлениях и даже с выделением отдельных концентрических слоев в двухфазном вихре;

- в-третьих, несимметричность вихря в аппарате и за ним существенно снижена;

- в-четвертых, разработаны средства для активизации или замедления процессов тепломассообмена в разных слоях вихря и по его длине;

- в-пятых, предложены и отработаны приемы увеличения времени пребывания взвеси в вихре установкой дополнительных камер с подачей и без подачи в них взвеси и воздуха.

При создании уже коммерческих аппаратов мы выборочно внедряли некоторые из этих результатов.

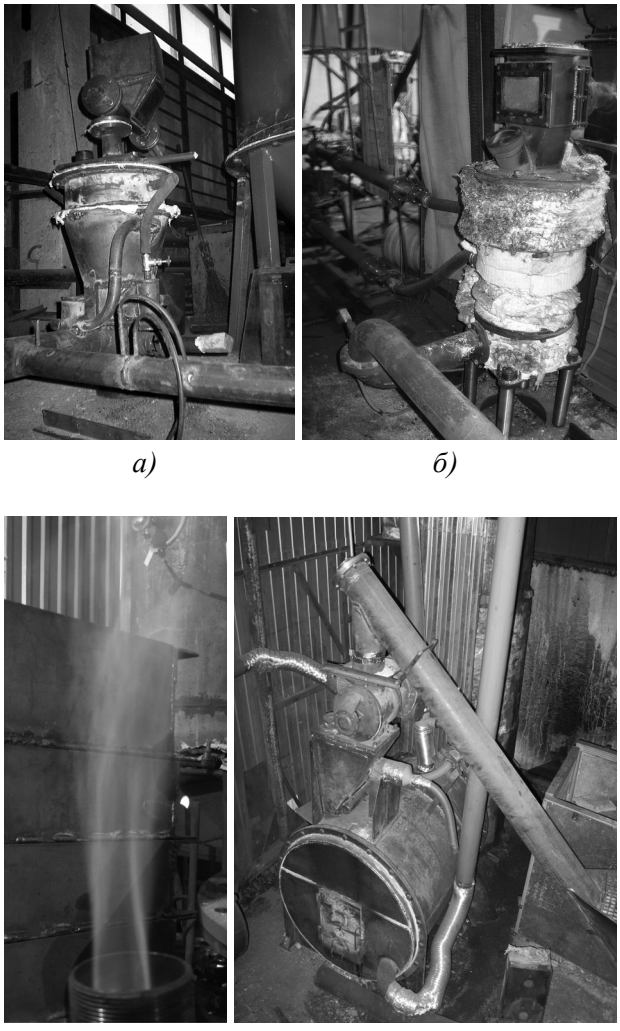
ПЕРВЫЙ ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ НОВОГО ТИПА

Первый работоспособный газогенератор опытно - промышленного назначения с вертикальной осью для газификации опила, тепловой мощностью по полученному газу 1,5 МВт создан нами, изготовлен и испытан еще в 2004 году. Далее его схема была исследована на модулях с горением мощностью от 50 до100 кВт (Рис.1а). Далее схема в экспериментах разного объема опробована на опиле, коре, торфе, буром угле и смесях угля с разной биомассой, но уже в других работоспособных аппаратах тепловой мощностью до 0,5 МВт (Рис.1б). Для

них в 2007 году нами создана простая система очистки части получаемого газа для подачи его на ДВС (Рис.1в), а для сжигания в котле другой части не очищенного газа создана новая вихревая горелка. Ее прототип мощностью до 100 кВт, был опробован и показал устойчивое горение и широкие возможности для влияния на ее горящий закрученный факел (на угол раскрытия, на длину, на интенсивность смешения в факеле при воспламенении и горении газа). На базе этой горелки мы опробовали весьма простую, но уникальную пылеугольную горелку со встроенной в нее оригинальной технологией внутренней управляемой частичной газогенерации грубой угольной пыли (размером до 0,6 мм) внутри горелки для последующего факельного сжигания газа и горящего углеродного остатка. Получено устойчивое управляемое горение этой смеси газа и углеродного остатка в факеле в холодном открытом помещении даже при температуре около нуля.

Одновременно были опробованы модели камер с горизонтальной осью вихря. Это было необходимо тогда для повышения мощности и управляемости газогенераторов и для снижения содержания в газе золы и смол. На их основе нами созданы аппараты с горизонтальной осью, отработанные на горячих моделях мощностью по газу 0,2-0,6 МВт. Одна из них (Рис.1г) положена нами в основу уже мощных коммерческих аппаратов. Отработка процессов в таких аппаратах показала, что целесообразно делить в них процесс на 2, 3 и более стадий. Разделение на стадии вихря реализуем внутри единого аппарата с последовательным переходом этого единого вихря из одной зоны или камеры аппарата в другую.

Поэтому одновременно с отработкой отдельных решений нами совершен переход к многокамерным аппаратам с горизонтальной осью развивающегося вихря. Первый трехкамерный газогенератор для коммерческого применения тепловой мощностью по горючему газу 2,5 МВт был разработан нами и внедрен в 2011 году для газификации шелухи овса на заводе переработки зерна (Рис.2а). Постоянная эксплуатация этого аппарата, начиная с 2012 года, вместе с простейшим оборудованием для очистки и подготовки газа к сжиганию на паровом котле дала материал для создания коммерческих аппаратов для газификации опила (Рис.2б), рисовой шелухи, торфа и некондиционных для переработки фракций горючих сланцев. Доработка всех этих аппаратов позволила получить в первой камере газификатора окислительный пиролиз шелухи, а в настоящее время мы проверяем возможность подавать в аппарат внешний пар. Также на этом аппарате мы получили полное разложение в последней камере тяжелых смол. Мощность аппарата при организации и выделении зоны пиролиза нам удалось увеличить в три раза - с 2,5 МВт до 7-7,5 МВт. Причем было повышено и качество генераторного газа.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис.1 Вихревые газогенераторы нового типа: а) на опиле (2004); б) – на опиле, торфе, углях, коре (2005-2007); в) чистый газ для ДВС (2006-2007); г) – аппарат на углях и сланцах (2010-1011).

Одновременно нами был установлен и отработан совершенно необычный режим самостабилизации работы аппарата, который обе-

спечил возможность поддерживать процесс без участия персонала или автоматики. В этом режиме аппарат (Рис.2а) может работать десятки часов при бесперебойной подаче биомассы в бункер даже при кратковременных, но чувствительных изменениях качества биомассы.

а)

б)

Рис.2 Промышленные (коммерческие) газогенераторы нового типа (2011-2012): а) 2,5-7,5 МВт на шелухе овса; б) 2,5-3 МВт на опиле.

В режимах самостабилизации различно изменяется сопротивление всех камер аппарата и происходит изменение расхода воздуха, который пропускает через себя аппарат при постоянном режиме работы дутьевого вентилятора. Изменения сопротивления ряда узлов газогенератора при колебаниях качества топлива, вызывают изменения расхода потребления воздуха, изменяют режим газогенерации, который в итоге полностью компенсирует изменения расхода воздуха при постоянном режиме работы дутьевого вентилятора и подачи шелухи (без воздействия персонала на подачу воздуха и топлива в аппарат). Газогенерация при этом сохраняется, конечно, в пределах допустимых для потребителя изменений количества и качества полученного горючего газа.

Предложенные нами средства формирования и позонного управления пиролизом, газогенерацией, и дожиганием углерода в этих режимах, а также разложение смол внутри самого аппарата показали перспективность наших технологий при работе на сырье с зольностью в диапазоне 1-10% до 60-63% и максимальной влажностью от 10-12 до 15-20%. Поэтому тому, кто заинтересован, мы рекомендуем опробовать наши схемы аппаратов для переработки и для сжигания углей, отходов, торфа, сланцев и битуминозных песков. Диапазон температур в первой камере обычно поддерживаем в диапазоне от 350-400 до 850-900^{o}C, а на выходе из аппарата поддерживаем температуру 750-850^{o}C. На горизонтальном газогенераторе пребывание топлива составляет 2,5-3 сек. Но на опытных аппаратах иных схем это время иногда увеличивали до 15-20 сек. В модели аппарата термохимической переработки тяжелых металлов время пребывания 99% сырья было доведено нами до 30 минут, для чего мы отработали технологии аэродинамических ловушек в этих аппаратах.

Считаем, что наши аппараты, - это новый тип вихревых газогенераторов. На той же базе можно создать новый тип вихревых топок, в том числе под схемы сжигания типа “Clean-Coal” (“Oxi-Coal Combustion“) схем снижения выбросов CO_2 или для производства искусственных жидких топлив. Например, на одном из опытных аппаратов по переработке отбельной глины температура процесса снижалась нами до 200-300^{o}C с устойчивым процессом газификации. Полученный при этом газ горел как пары дизельного топлива.

Сложнее оценивать перспективы коммерческой генерации газа из органики и энергетических углей для котлов или газовых турбин ТЭС - тепловых электростанций. Оправданность

внедрения таких технологий следует доказывать с учетом режимов работы ТЭС на отдельные сегменты коммерческих рынков электроэнергии, а также от особенностей систем подготовки газа к сжиганию, особенно в двигателях разных типов. Даже на котлах проблема очистки газа от золы сильно осложнит и удорожит эксплуатацию газогенерации, если котел заранее не был приспособлен к сжиганию твердых топлив и не был оснащен схемой очистки продуктов сгорания.

Газогенерация углей для газовых турбин (ГТ), считаем, может быть коммерчески сомнительной. Неочищенный и слабо очищенный от золы и смол газ, содержащий набор кислот, тяжелых металлов и других элементов нельзя подать в современные экономичные зарубежные газовые турбины (ГТ), если ТЭС будет работать на рынок электроэнергии, контролируемый Системным Оператором. Условия надежности, безопасности и штрафные санкции за нарушение правил рынка потребуют сложных и дорогостоящих мер выполнения требований этих правил. Прежде всего, потребуется мощная и очень качественная очистка горючего газа, без которой поставщики современных ГТ откажут в поставке или снимут с себя все обязательства и гарантии. Газоочистка нужного высокого качества повысит затраты на собственные нужды ТЭС до 6-12%, а их КПД нетто при этом всегда будет ниже, чем КПД лучших зарубежных паротурбинных ТЭС на твердых топливах. Мощные энергоблоки ПГУ на искусственных газах из энергетических топлив, по нашим данным, практически нигде в рыночной энергетике не доказали конкурентоспособности в сравнении с современными паротурбинными ТЭС на тех же углях. По имеющейся, хотя и не полной, информации, многие блоки ПГУ с газификацией не работают постоянно на расчетных углях, а лишь на их смесях с нефтяным коксом или на этом коксе. Это указывает на неперспективность этих технологий для мощных ТЭС на энергетических углях.

Считаем, выгоднее, доступнее и перспективнее внедрять газогенерацию местных, малотоварных топлив, отходов и биомассы, а газ подавать на ДВС и малые ТЭЦ местного энергопотребления. Причем, будет наиболее эффективно если на ТЭЦ установлена турбина с противодавлением и сбросом теплоты на потребителей. А от ГТ для коммерческого использования можно вообще отказаться. Поэтому выбор аппаратов газогенерации в технологиях получения энергии для рынка, или для собственных нужд, жестко зависит от вида топлива и его стоимости (привозного товарного энергетического, местного нетоварного, дешевых или бесплатных отходов, биомассы, а также местного торфа и т.п.). Выбор аппаратов и технологий зависит и от потребителя энергии, то есть от типа ТЭС (ТЭЦ), или назначения котельной, но главное, - от сегмента рынка энергии, на который установка будет работать постоянно. Поэтому схемы ТЭС или котельных, оптимальные для газогенерации разных топлив и биомассы, могут отличаться от схем обычных ТЭС, где используют факельное сжигание энергетических топлив.

Анализ известных схем ТЭС позволил выделить лучшие и предложить свои оригинальные схемы. Особенность наших схем состоит в разделении отпуска теплоты газогенерации на два потока. Первый, малый поток (5-10 % от теплоты сгорания исходного топлива), отводим при охлаждении газа с 800-900 °С до 100-400 °С перед золоуловителями. Второй поток, в основном в виде теплоты сгорания газа, подаем в котел. Самая эффективная из наших новых схем ТЭЦ показана ниже (Рис.3).

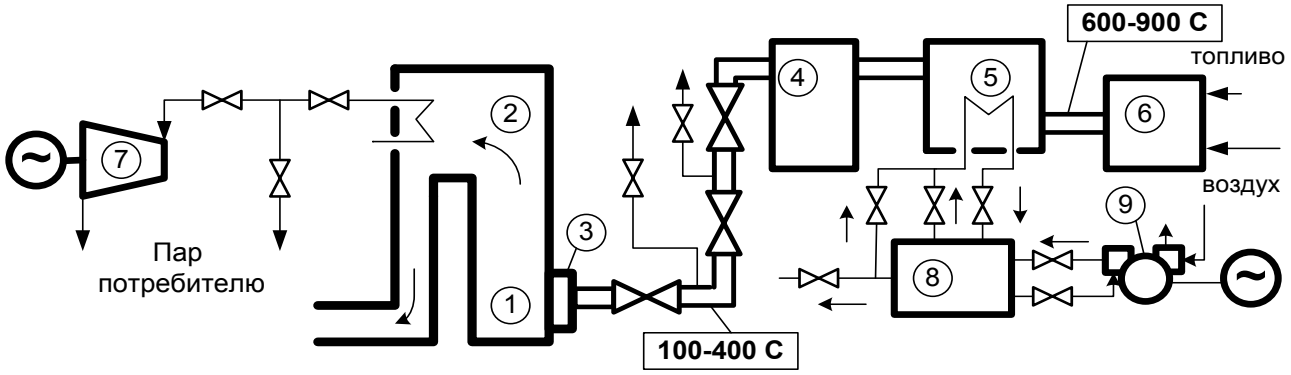


Рис.3 Новая ТЭЦ с независимой работой части электрогенерации от работы основного оборудования ТЭЦ: 1 – топка, 2 – котел, 3 – горелка, 4 – золоуловитель, 5 – охладитель газа, 6 – генератор газа, 7 – паровая турбина без конденсатора, 8 – бак – аккумулятор теплоты, 9 – двигатель Стирлинга с электрогенератором.

Это схема независимых от работы ТЭЦ аккумуляции и подачи первого потока тепла на выработку электроэнергии и на отопление. В схеме этот поток теплоты (5-10% от теплоты топлива) отводится теплоносителем (водой и др) в бак-аккумулятор (температура 80-500°С). Из бака теплота может подаваться, как на отопление, так и на производство электроэнергии. Для производства электроэнергии вместо цикла Ренкина и циклов на органических теплоносителях лучше всего внедрить привод электрогенератора от двигателя Стирлинга. Они имеют высокий КПД (до 53-54%), а их реальный тип можно подобрать под температуры теплоносителя в баке-аккумуляторе.

К сожалению, для небольших производителей и потребителей электроэнергии и теплоты в условиях современного российского рынка электроэнергии строительство новой энергоустановки с генерацией газа вместе с установкой новых паровых турбин и даже двигателей Стирлинга будет слишком дорого, сложно и пока достаточно рискованно. Поэтому, по нашему мнению, пока остается лишь одно решение, которое можно рекомендовать: это генерация газа для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в схемах частичного энергопотребления предприятия или его отдельных объектов с независимой или параллельной работой с сетью.

Для коммерчески оправданной реализации этого направления считаем пока наиболее приемлемым использование предложенного нами нового класса вихревых газогенераторов, которые на отдельных видах биомассы показали получение горючего газа без содержания самых тяжелых смол, что крайне важно для надежной работы ДВС. Кроме того, ряд схем наших аппаратов позволяет производить частичное улавливание золы в самом аппарате.

Для более глубокой очистки газа от золы нами разработан и находится в изготовлении совершенно новый вихревой аппарат, устанавливаемый сразу за генератором газа для более глубокой очистки этого газа от летучей золы и при этом, одновременно, для предельно полного дожигания в золе остаточного углерода. Испытание одного из прототипов схемы на высокозольном топливе показали возможность снижения q_4 всей установки до уровня ниже 0,5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый класс вихревых генераторов газа, например, для получения энергии из разных видов органических отходов, биомассы, торфа и местных твердых топлив на установках небольшой мощности. Три разных аппарата уже находятся как в постоянной, так и в опытной эксплуатации. Наши аппараты отличаются снижением выхода смол, в некоторых возможна сепарация части золы с высоким выгоранием углерода. Под эти аппараты подобраны и разработаны новые схемы ТЭЦ разной сложности. В части из них возможно сохранение производства доли энергии при кратковременных остановах оборудования всей энергоустановки. В реальных условиях пока проще, эффективнее и надежнее использовать генераторы газа нашей разработки в ДВС установок местного или внутреннего энергопотребления.