

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

*Наталья Цивенкова, Анна Голубенко, Александр Муляр,
Леонид Лось, Александр Романишин*

*Житомирский национальный агроэкологический университет
Ул. Бульвар Старый 7, Житомир, Украина. E-mail: thyvenkova@yandex.ru,*

*Nataliya Tsyvenkova, Anna Golubenko, Aleksandr Mulyar, Leonid Los, Aleksandr Romanyshyn
Zhytomyr national agroecological university
St. Stary Blvd., 7, Zhytomyr, Ukraine. E-mail: thyvenkova@yandex.ru*

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования технических параметров системы очистки генераторного газа, полученного из сырья растительного происхождения, от механических примесей и смол в экспериментальной энергетической установке Житомирского национального агроэкологического университета (ЖНАЭУ), оборудованной газогенератором обращенного процесса газификации. Система очистки газа состоит из орошаемого насадочного скруббера и сухого очистителя с набивочными материалами.

В процессе работы исследовались зависимости коэффициента очистки газа от: расхода воды на его охлаждение и очистку для нескольких типов орошаемых насадок; скорости газа в скруббере для скрубберов с различным сечением; высоты насадки и ее удельного объема.

В результате исследований определен дисперсный и абразивный составы пыли, а также фракционный состав смол, содержащихся в газе до и после очистителя. Доказана возможность получения генераторного газа с низким смолосодержанием (20...30 мг/м³) посредством разработанного очистителя, что обеспечивает высокие эксплуатационные показатели работающего на нем теплотехнического оборудования.

Полученный при исследованиях коэффициент очистки газа от зольных абразивных частиц составил более 99 %. Оставшиеся после очистителя в генераторном газе механические примеси на 91...95 % состояли из углеродисто-сажистых частиц, обладающих незначительными абразивными свойствами, благодаря чему газ безопасно сжигать как в топках зерносушилок, так и в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Разработанный комбинированный очиститель является простым и эффективным способом очистки газа от механических примесей и смол, имеет небольшое аэродинамическое сопротивление системы, отличается простотой конструкции и является недорогой альтернативой дорогостоящему очистному оборудованию в условиях небольших сельскохозяйственных предприятий.

Ключевые слова: газогенератор, генераторный газ, биомасса, система охлаждения газа, система очистки газа.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рост цен на традиционные энергоносители способствует широкому развитию технологий альтернативной энергетики, одной из которых является газификация [8, 12]. Однако для надежной работы теплотехнического оборудования, работающего на генераторном газе, следует обеспечить его надлежащее охлаждение и очистку. Наличие в газе механических примесей абразивного характера вызывает износ деталей и узлов оборудования, сокращая их срок службы, а высокое содержание смол приводит к сбоям в работе регулирующей аппаратуры.

В наше время широкое распространение получили физико-химические методы очистки газов, в частности адсорбционные. Они характеризуются бесперебойностью и универсальностью процесса, экономичностью и возможностью извлечения большого количества примесей из газа.

В Европе на предприятиях, применяющих стационарные газогенераторные установки (ГГУ) производительностью свыше 1000 м³/ч используют технологические схемы мокрой очистки газа, включающие насадочные скрубберы, барботажные, и даже пенные аппараты, обеспечивающие высокую степень извлечения механических примесей и полную регенерацию адсорберов лишь при наличии большого количества степеней очистки.

В качестве альтернативы хорошо зарекомендовали себя системы очистки и охлаждения газа, состоящие из двух ступеней: орошаемого насадочного скруббера и сухого очистителя. Это объясняется простым и эффективным способом охлаждения газа в данных системах, высокой степенью очистки газа от механических примесей, невысоким аэродинамическим сопротивлением системы, простотой конструкции и невысокой стоимостью. Однако если речь идет об очистке газа от смол, то указанные очистные системы хорошо применимы в установках с газогенераторами двухзонного или обращенного процессов газификации, где крекинг смол обеспечивается конструкцией и температурными режимами в самом газогенераторе [16, 26, 27].

В условиях небольших сельскохозяйственных предприятий для обеспечения технологических процессов недорогой энергией целесообразно использовать стационарные ГГУ производительностью до 200 м³/ч. Оснащать такие установки дорогими фильтрующими аппаратами нерационально.

Для малых хозяйств и предприятий важными факторами использования очистителей газа, помимо качества, являются простота конструкции, возможность безопасного и легкого технического обслуживания, доступность фильтрующего материала для дешевой его замены или возможность самостоятельного восстановления его фильтрующих свойств, а также относительная стабильность коэффициента очистки газа во времени. Однако, не смотря на важное значение очистки и охлаждения генераторного газа, исследования в направлении рациональности применения вышеуказанных систем для газогенераторов средней и малой производительности, обеспечивающих работу ДВС, топочных горелок и т.п., не проводились.

Поэтому актуальными являются вопросы проведения таких исследований, изучения параметров системы очистки и охлаждения генераторного газа из растительного сырья, и получения данных по качественной характеристике загрязнений газа, что позволит судить о применимости данного газа для использования в том или ином видах оборудования.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Основным направлением работ в отрасли газоочистки является выбор оптимальной по технико-экономическим показателям схемы очистки с учетом физико-химических свойств компонентов газа, технических параметров газового потока, с использованием уже известных конструкций газоочистного оборудования и аппаратов [1–7, 13–16].

Проведенный анализ оформления технико-технологических схем очистки генераторных газов из различного сырья показывает, что при их оформлении не использовались научно-обоснованные критерии выбора. Так, с целью очистки генераторных газов от тех самых компонентов применялись различные конструкции устройств по улавливанию пыли и массообменных аппаратов. Причем одни из них имеют высокую энергоемкость, такие как рукавные фильтры, насадочные аппараты; другие – сложные по конструктивному оформлению и в эксплуатации – колонное оборудование, электрофильтры; третьи – низкоэффективные, например пенные и механические аппараты.

Для очистки генераторных газов в промышленных масштабах используют технологические схемы, имеющие как широкий спектр типов очистных аппаратов, так и характер схем их подключения: последовательное или параллельное [1, 14]. Последовательное соединение исключает наличие промежуточных потоков, что повышает эффективность газоочистных систем. Однако они являются многостадийными из-за низкой эффективности отдельных ступеней в связи с наличием в газовой фазе механических примесей, выводящих из строя абсорбционные аппараты [3]. Параллельное соединение аппаратов используют при низкой производительности одиночных аппаратов и необходимости очистки газов больших объемов [11, 18, 28].

Поскольку известное газопылеочистное оборудование имеет множество видов, как по функцио-

нальному назначению, так и по конструктивному оформлению, необходимо использовать системный подход к его выбору.

Анализом, моделированием и расчетом технологических процессов, созданием эффективных средств и мероприятий по очистке генераторных газов занимались В.Н. Болтинский, А.И. Бояринов, В.В. Кафоров, П. А. Коузов, Б.Н. Лоскарин, А.И. Нисневич, П. Н. Сухомлин, И.В. Петрянов-Соколов, С.А. Шуров и др. Основоположниками в теории кондиционирования выступают Д. Мойер и Р. Фиттц [15]. П. Н. Сухомлин, П. А. Коузов [20], В. В. Батулин [5], профессор П. Н. Каменев [10] исследовали технические характеристики и режимы работы циклонов для очистки генераторного газа. Интересной, с точки зрения моделирования, является работа Л. Тищенко, С Харченко, Е. Гаек по построению математической модели динамики запыленного воздушного потока в разработанном циклоне [22]. Повышением эффективности пылеулавливания батарейных циклонов занимались Куц В.П., Каспрук В.Б. [13, 17].

В работах А. Д. Малигина, Г.М. Скрябина [11], В.В. Кафорова рассмотрены технологии и аппараты мокрой очистки газов, позволяющие производить очистку того же генераторного газа без предварительной подготовки. При этом в таких аппаратах одновременно протекают процессы абсорбции и очистки газов от примесей абразивного характера. Недостатком такой технологии является то, что конструкции очистителей мокрого типа при очистке генераторного газа с примесями абразивного характера, выходят из строя из-за налипания мокрых твердых частиц и засорения смолами. Эффективность очистки газа уменьшается и при очистке дисперсных частиц, имеющих плохую способность к смачиванию.

В последние десятилетия хорошо зарекомендовали себя отечественные конструкции газоочистного оборудования, которые не уступают лучшим зарубежным образцам и позволяют решить большинство проблем, появляющихся при выборе очистного оборудования для газов с различными физико-химическими свойствами. Перспективным направлением интенсификации процесса мокрой очистки газа является использование оборудования, работающего в режиме развитой турбулентности [4, 19, 21]. Производительность аппарата и повышение эффективности очистки газа увеличивается за счет роста скорости газа, что также способствует снижению материалоемкости конструкции. В указанном режиме работает целый ряд конструкций оборудования, такого как аппараты с подвижными насадками, вихревые аппараты, аппараты с провальными тарелками больших отверстий и т.п.

Широкий спектр такого газоочистного оборудования представлен компанией «Центр материаловедения» [25], акционерным обществом УкрНИИОгаз [24], Запорожским заводом газоочистного оборудования [9], однако оно является дорогостоящим при использовании в газогенераторных установках с газогенераторами низкой производительности (до 200 м³/ч), что неоправданно удорожает конструк-

цию всей установки. К тому же генераторный газ является специфическим для очистки из-за физико-химических свойств загрязняющих веществ и смол, дисперсного состава механических примесей и их концентрации [12], поэтому газоочистное оборудование, предназначенное для природного газа, для него не подходит, поскольку не будет обеспечивать нужную степень очистки.

Работы, посвященные теории и расчетам процессов, протекающих в скрубберах, при очистке генераторных газов касаются лишь вопросов охлаждения газа и совершенно не затрагивают вопроса его очистки. Эксплуатационные данные и рекомендуемые параметры по очистке силового газа для стационарных установок противоречивы [23].

Изложенное выше послужило причиной проведения ряда исследований по созданию эффективных систем очистки и охлаждения силового генераторного газа из растительного сырья в генераторных установках малой производительности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изучить факторы, влияющие на очистку и охлаждение генераторного газа, получить экспериментальные данные по качественной характеристике загрязнений газа на выходе из газогенератора: по дисперсному составу механических примесей, их физико-химическим и абразивным свойствам, фракционному составу смолы для различных видов топлива растительного происхождения. Определить содержание примесей в газе после каждой ступени очистки комбинированного очистителя, изменяя при этом технические параметры и режимы работы мокрой ступени очистки и типы фильтрующей насадки для сухой ступени. Рассчитать общий коэффициент очистки газа установкой и коэффициенты очистки газа по ступеням.

Объектом исследования является процесс получения качественной характеристики загрязнений генераторного газа механическими примесями и смолами с помощью комбинированной системы очистки газа, адаптированной к газогенераторной системе с газогенератором обращенного процесса газификации.

Предметом исследования являются зависимости коэффициента очистки газа от: расхода воды на его охлаждение и очистку для нескольких типов орошаемых насадок; скорости газа в скруббере для скрубберов с различным сечением; высоты насадки и ее удельного объема.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследование технико-технологических параметров процесса очистки генераторного газа проводилось на установке Житомирского национального агроэкологического университета, оснащенной газогенератором обращенного процесса газификации, работающего на растительном сырье (солома зерновых, мискантус, древесная щепа и т.п.) рис. 1.

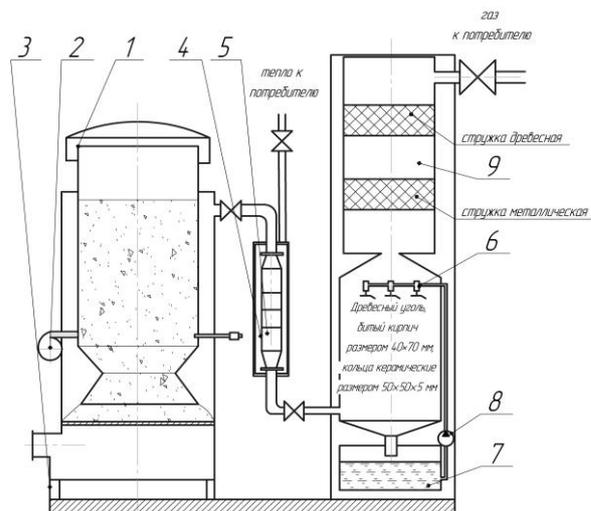


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки ЖНАЭУ: 1 – газогенератор обращенного процесса газификации; 2 – центробежный вентилятор; 3 – зольник; 4 – термопара; 5 – теплообменник; 6 – водоразбрызгивающее устройство; 7 – резервуар с водой орошаемого насадочного скруббера; 8 – насос; 9 – ступень сухой очистки

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental installation of ZNAEU: 1 – downdraft gas producer; 2 – centrifugal electric blower; 3 – ashtray; 4 – thermocouple; 5 – heat exchanger; 6 – water-spraying device; 7 – water reservoir for wet scrubber; 8 – pump; 9 – dry cleaner stage

Генераторный газ, поступающий в систему охлаждения и очистки лабораторной установки ЖНАЭУ, при производительности газогенератора 60...68 м³/ч, имел следующие технические параметры: температура – 500...600 °С; теплотворная способность – 5...6,6 МДж/м³; содержание влаги – 60...120 г/м³; содержание механических примесей – 0,6...1 г/м³; содержание смол – 0,1...0,2 г/м³.

Комбинированная система очистки состояла из мокрой и сухой ступеней. Мокрая ступень – это орошаемый насадочный скруббер высотой 0,5 м. Фильтрующая насадка представляла собой резервуар с насыпным наполнителем, в качестве которого использовалась фасонная или кусковая набивка (керамические кольца, древесный уголь, кирпич, опилки и т.д.).

Сухая ступень включала фильтрующую насадку (древесная, металлическая стружка) общей высотой 0,7 м.

Вода для орошения мокрой ступени подводилась к разбрызгивающему устройству – четырем форсунам с диаметром отверстий Ø4 мм. Струя воды из этих форсунок направлена на подвешенные с помощью двух штанг стальные диски, ударяясь о которые, вода разбрызгивалась в стороны и вверх в виде капель и частично стекала струями на насадку. Использование более мелкодисперсного распыления показало ухудшение качества очистки газа из-за значительного переноса массы воды в ступень сухой очистки, повышения аэродинамического сопротивления системы фильтрации в целом и необходимость дополнительного осушения газа на выходе из

фильтра, в то время как капельное орошение позволило при сохранении простоты конструкции обеспечить высокие рабочие характеристики очищенного газа.

Отобранный из газогенератора газ поступает в нижнюю часть комбинированного очистителя и, поднимаясь вверх через мокрую и сухую ступени очистки, отбирается через выходной патрубок. Комбинированный очиститель имеет предварительный теплообменник для охлаждения генераторного газа, с возможностью последующей полезной утилизации тепла в других теплотехнических системах.

Температура газа перед комбинированным очистителем замерялась хромель-алюмелевой термопарой ТХА (К) по ДСТУ 2837-94 с рабочим диапазоном от $-270...+1372$ °С и чувствительностью 41 мкВ/°С. Температура внутри очистителя замерялась дистанционным манометрическим термометром ТМП-100С, диаметром 100 мм с диапазоном измерения от 0 до 400 °С по ДСТУ 3518-97. Температура газа на выходе из очистителя – термометром ртутным ТЛ-4 по ТУ 25-2021.003-88.

Соппротивление в отдельных узлах комбинированного очистителя измерялось струйным пьезометром.

Расход газа регулировался дроссельной шайбой, а его теплотворная способность измерялось калориметром согласно принятой методике и отраслевым стандартам и подсчитывалась по анализу газа [27]. Расход воды учитывался счетчиком воды.

Степень загрязнения генераторного газа определялась с использованием лабораторной установки (рис. 2).

Дисперсный состав пыли перед очистителем определялся аспирационным методом с использованием фильтра АФА-ВП-20. Пыль после очистителя указанным методом отобрать не получалось, поскольку будучи увлажненной в мокром очистителе, она засоряла фильтр и создавала большое сопротивление дальнейшему прохождению газа. Поэтому после очистителя навеска пыли отбиралась со стен изогнутого колена трубы, где осаждалось наибольшее количество уноса. Мелкодисперсные частицы в большей мере проскакивали далее по системе, поэтому определенный дисперсный состав показывал заниженное количество частиц наиболее мелких фракций. При анализе вредного влияния загрязнений силового генераторного газа на износ поршневой группы двигателя внутреннего сгорания данный факт учитывался. Перед проведением анализа навеска пыли обрабатывалась ацетоном с целью удаления смолистых веществ, а затем сушилась при комнатной температуре ($18...22$ °С). Дисперсность определялась методами ситового анализа [11] и механического просева мелких фракций в пневмокласификаторе. Методом ситового анализа определялась дисперсность фракций с величиной частиц от 43 мкм и выше. Фракции пыли с дисперсностью фракций меньше 43 мкм определялись методом механического просева в пневмокласификаторе.

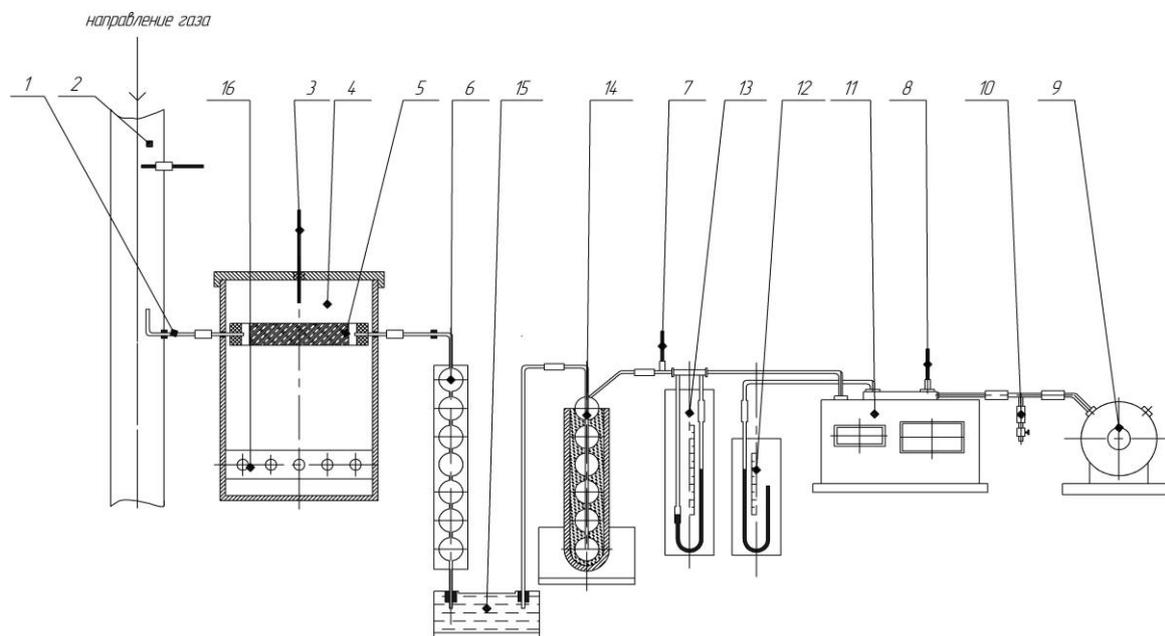


Рис. 2. Схема лабораторной установки для определения степени загрязненности газа: 1 – газоотборная трубка; 2 – газовая труба; 3 – термометр; 4 – термоизоляционный кожух; 5 – фильтр; 6 – водяной охладитель газа; 7, 8 – термометры; 9 – вентилятор; 10 – регулятор; 11 – газовый счетчик; 12 – ртутный манометр; 13 – реометр; 14 – конденсатор глубокого охлаждения; 15 – приемник для конденсата; 16 – нагревательный элемент

Fig. 2. Schematic diagram of laboratory installation for gas contamination degree measuring 1 – gas sampling pipe; 2 - gas pipe; 3 - thermometer; 4 - insulating casing; 5 - filter; 6 - water gas cooler; 7, 8 - thermometers; 9 - blower; 10 - regulator; 11 - gas meter; 12 - mercury manometer; 13 – flow-meter; 14 - deep-cooled condenser; 15 - receiver for condensate; 16 - heating element

Экспериментальная работа состояла в определении, как суммарного коэффициента очистки комбинированного очистителя, так и коэффициента очистки орошаемой насадки. Изменяемыми параметрами были влажность топлива W^P , расход воды V_v и вид орошаемой насадки, скорость газа в скруббере, площадь поперечного сечения скруббера.

В качестве топлива для газификации использовалось растительное сырье с влажностью $W^P=20\ldots 40\%$ и содержанием золы $4\ldots 7\%$.

Газогенератор был выведен на постоянный режим работы с производительностью по газу $60\ldots 68\text{ м}^3/\text{ч}$, что примерно соответствовало потреблению газа двигателем внутреннего сгорания с номинальной мощностью 30 кВт .

Постоянство режима работы газогенератора обеспечивалось дозагрузкой газогенератора в процессе работы, благодаря чему генераторный газ, подаваемый в очиститель, имел относительно постоянные параметры как по температуре, так и по загрязненности, что являлось необходимым условием достоверности полученных в ходе эксперимента данных.

Для установления зависимости коэффициента очистки газа от расхода воды, вода поступала из системы под давлением $0,1\ldots 0,2\text{ МПа}$, и ее расход варьировался в пределах $300\ldots 1200\text{ л/ч}$, или $4,5\ldots 18\text{ л/м}^3$.

Для исследования зависимости коэффициента очистки газа от скорости газа в скруббере было необходимо создать систему фильтрации, совместимую по конструктивно-технологическим параметрам с газогенератором заданной производительности с целью обеспечения оптимальных условий фильтрации и высокого коэффициента очистки. Для этого было изготовлено несколько вариантов скрубберов различного сечения, позволяющих без изменения производительности газогенератора по газу получить несколько кратных скоростей газа в очистителе при неизменных расходе воды и высоте насадки.

Использовались следующие типы орошаемой насадки: фасонная – из керамических колец размером $50\times 50\times 5\text{ мм}$ и кусковая – битый кирпич и древесный уголь с размером кусков 70 мм . Каждый вид насадки испытывался при нескольких плотностях орошения.

В качестве насадки были также использованы древесные опилки, но в процессе исследований от них пришлось отказаться, поскольку они, имея высокую насыпную плотность ($320 - 580\text{ кг/м}^3$ при влажности более 15%), создавали высокое аэродинамическое сопротивление системы, что ухудшало, а иногда просто останавливало движение газа в очистителе.

В литературных источниках [6, 11, 28] указано, что в насадочных орошаемых скрубберах эффективность насадки зависит от ее удельной поверхности, которая зависит, в свою очередь, от геометрии насадки, но не указано о влиянии этой поверхности на степень очистки газа, что и послужило причиной проведения исследований в данном направлении.

Влияние высоты заполнения насадки наполнителем, а вместе с этим и удельного объема насадки исследовались в комбинированном очистителе установки Житомирского национального агроэкологического университета и в скруббере уменьшенного поперечного сечения. В комбинированном очистителе испытывались насадки с высотой $0,5$ и $0,3\text{ м}$, в скруббере уменьшенного диаметра – $0,5\text{ м}$; $1,0\text{ м}$; $1,5\text{ м}$.

Общее количество опытов составило 50 . В сводных таблицах приводятся усредненные данные $2-5$ опытов по каждому исследуемому фактору, влияющему на очистку газа.

В плане исследования были допущены некоторые упрощения, к примеру, не запланировано исследование аэродинамического сопротивления орошаемой насадки в зависимости от наполнителя и различных режимов орошения, влияние геометрии наполнителя на длину пути газа сквозь насыпную массу, увеличение насыпной плотности фильтрующей орошаемой массы в процессе эксплуатации и т.п. Данные упрощения не повлияли на результаты эксперимента, но оставили поле для дальнейших исследований с использованием существующей лабораторной установки.

Очистные характеристики сухого очистителя в данной работе отдельно не исследовались, однако полученные данные позволили сделать выводы касательно технических параметров очистки генераторного газа.

Для проведения исследований была рассчитана удельная поверхность насадок, которая составила: для кусковой насадки с размерами кусков 70 мм – $18\text{ м}^2/\text{м}^3$, а для фасонной с керамическими кольцами – $42\text{ м}^2/\text{м}^3$ при нормальной насыпной плотности наполнителя.

Для указанных видов наполнителя насадки коэффициенты очистки исследуемого генераторного газа определялись при расходах воды $7, 10$ и 15 л/м^3 . Показатели степени очистки газа приведены в табл. 1.

Анализируя табл. 1 можно сделать вывод, что данные по коэффициенту очистки по смолам и механическим примесям для кусковых насадок из битого кирпича и древесного угля практически не отличаются. Увеличивая степень орошения с 7 до 15 л/м^3 , возрастает степень очистки от механических примесей, цифровые значения которой несколько выше, чем для смол. Например, для древесного угля при увеличении степени орошения с 7 до 15 л/м^3 общий коэффициент очистки от механических примесей повысился на 10% , а для битого кирпича – на 11% . По смолам коэффициенты очистки по этим типам насадок также практически не отличаются в заданном диапазоне расхода воды.

Наивысшие показатели по коэффициенту очистки зафиксированы для насадки из керамических колец: при расходе воды 15 л/м^3 общий по механическим примесям составил $86,3\%$, а по смолам – $78,7\%$.

Таблица 1. Показатели степени очистки генераторного газа

Table 1. Indicators of generator gas purification factor

Режим газогенератора					Содержание примесей в газе, (г/м ³)						Коэффициент очистки, (%)				
Влажность топлива W ^p , %	Производительность V ^{газ} , м ³ /ч	Температура газа на выходе, T, °C	Теплотворность газа Q ^т , МДж/м ³	Вид орошаемой насадки	До очистителя		После орошаемой насадки		После сухой насадки		По механи- ческим примесям		По смоле		
					механических	смолы	механических	смолы	механических	смолы	для мокрой насадки	общий	для мокрой насадки	общий	
Расход воды 7,0 л/м ³															
20	67	622	5,96	древесный уголь	1,141	0,093	0,350	0,041	0,290	0,031	69,3	74,6	55,6	66,7	
24	64	548	5,73	битый кирпич	0,972	0,111	0,261	0,055	0,221	0,042	73,2	77,3	50,8	62,1	
31	66	539	5,62	кольца керами- ческие	0,823	0,264	0,175	0,112	0,154	0,081	78,7	81,3	57,7	69,2	
Расход воды 10,0 л/м ³															
20	67	618	5,85	древесный уголь	0,992	0,112	0,273	0,049	0,212	0,036	72,5	78,6	56,3	67,5	
24	64	513	5,63	битый кирпич	0,941	0,151	0,228	0,070	0,183	0,051	75,8	80,6	53,8	66,3	
31	62	528	5,38	кольца керамические	0,884	0,233	0,164	0,086	0,135	0,064	81,4	84,7	63,2	72,6	
Расход воды 15,0 л/м ³															
20	66	558	5,12	древесный уголь	0,932	0,144	0,218	0,061	0,170	0,045	76,6	81,8	57,6	69,1	
24	61	551	5,62	битый кирпич	0,913	0,112	0,199	0,050	0,152	0,033	78,2	83,4	55,4	70,2	
31	63	496	5,26	кольца керамические	0,851	0,251	0,152	0,079	0,117	0,054	82,2	86,3	68,5	78,7	

Отметим, что орошаемые насадочные скрубберы пригодны для очистки генераторного газа от смол только в том случае, когда они максимально полно крекируется в самом газогенераторе.

Также данные таблицы свидетельствуют, что основная масса механических примесей и смол улавливается мокрым очистителем с орошаемой насадкой (около 90 – 95 %).

Были зафиксированы колебания сопротивления орошаемой насадки (в пределах 10 Па) и сухого очистителя (до 500 Па), но детально зависимость сопротивления системы от типа применяемых насадок и режимов орошения исследована не была. Суммарное сопротивление системы составило около 670 Па.

Исходя из данных таблицы видно, что повышение расхода воды на орошение повышает степень очистки газа, но следует исследовать, до каких пределов по расходу эта тенденция будет сохраняться.

Верхним пределом плотности орошения является затопление [18].

Нижним пределом плотности орошения насадки является то количество жидкости, которое покрывает всю поверхность орошаемой насадки. Экспериментально это определяется границей роста коэффициента теплопередачи при увеличении подачи воды. Нижний предел орошения согласно [18]:

$$Q_{н.о.} = k \cdot f, \quad (1)$$

где: $Q_{н.о.}$ – нижний предел орошения, м³/м²·ч; k – коэффициент орошения ($k = 12 \dots 24$); f – удельная поверхность насадки, м²/м³.

Однако эта формула действительна при функции скруббера в качестве охладителя.

Согласно расчетам минимальная плотность орошения для кусковой насадки с размером кусков 70 мм составляет 5 – 10 м³/м²·ч, а для керамических колец – 10,5 – 21 м³/м²·ч. Для скруббера Ø 0,9 м для кусковой насадки расход воды должен быть 3...6 м³/ч, а для керамических колец – 6...13 м³/ч. Нормы орошения на 1 м³ генераторного газа составляют 5...20 л/м³ [23]. В существующей водяной системе комбинированного очистителя установки ЖНАЕУ расход воды варьировался в пределах 4,5...18 л/м³. Таким образом, существующие нормы орошения соответствовали лишь второму условию – расходу воды на 1 м³, а получить нижний предел орошения согласно нормам плотности орошения на единицу площади сечения скруббера, было возможно только для кусковой насадки. В результате, рассматривая мокрую ступень очистителя как насадочный скруббер, получили большую площадь поперечного сечения при низкой скорости прохождения газа 0,1 м/с при допустимых значениях этого параметра от 1 м/с. Но, даже при таких условиях работы, комбинированный очиститель газогенераторной установки ЖНАЕУ, при работе газогенератора на биомассе, показал достаточно высокие показатели эффективности очистки генераторного газа от механических примесей и смол. Это объясняется тем, что система распыления мокрой ступени очистителя ЖНАЕУ спроектирована аналогично системе распыления полых форсуночных скрубберов, в связи с чем плотность орошения имеет минимальное влияние на степень очистки газа.

Результаты исследований зависимости степени очистки генераторного газа от расхода орошающей воды приведены на рис. 3.

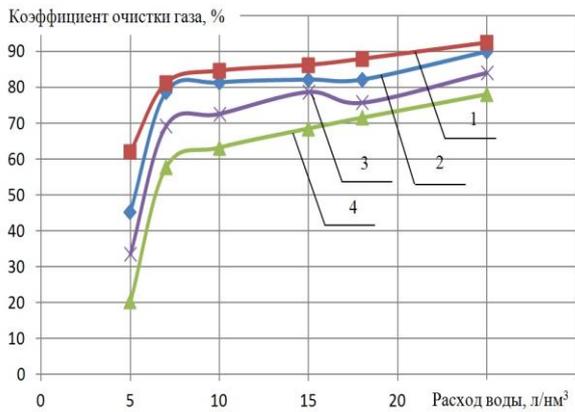


Рис. 3. Зависимость степени очистки газа от расхода воды: 1 – общий коэффициент очистки по механическим примесям; 2 – коэффициент очистки орошаемой насадки по механическим примесям; 3 – общий коэффициент очистки по смоле; 4 – коэффициент очистки орошаемой насадки по смоле

Fig. 3. Gas purification degree variation with water flow rate: 1 - total purification factor for mechanical impurities; 2 – wet scrubber purification factor for mechanical impurities; 3 - total purification factor for tars; 4 - wet scrubber purification factor for tars

Из графической зависимости следует, что с точки зрения очистки газа рационально работать в интервале расхода воды 10...15 л/м³, который, в данном случае, следует считать оптимальным. Недостаток воды (до 10 л/м³) не обеспечивает необходимую степень очистки газа от механических примесей, а при расходе воды свыше 15 л/м³ коэффициент очистки газа от механических примесей повышается лишь на 6% (общий коэффициент очистки по механическим примесям 92,5% при расходе воды 25 л/м³ по сравнению с 86,3% при расходе воды

15 л/м³), что является малоэффективным по сравнению с затратами на обеспечение системы дополнительной водой из расхода 10 л/м³. По коэффициенту очистки генераторного газа от смол прослеживается такая же тенденция.

Для охлаждения газа достаточен расход воды 7 л/м³, который обеспечивает температуру охлаждаемого газа в диапазоне 16...17 °С при температуре входящей воды в систему 9 °С, и 23...26 °С при температуре входящей воды в систему 18 °С. Однако, при температуре входящей воды 18 °С и расходе воды на орошение 7 л/м³ температура очищенного генераторного газа может достичь 45 °С, что негативно может сказаться на работе регулирующей аппаратуры соответствующего теплотехнического оборудования.

Объемные коэффициенты теплопередачи для орошаемой насадки находятся в пределах 1,17...2,1 МДж/м³·ч·°С, а колебания их значений в указанном диапазоне объясняется различным исходным влагосодержанием газа перед очистителем, которое изменялось в пределах 40...135 г/м³.

Величина поверхностных коэффициентов теплопередачи для орошаемой насадки составляла 0,0134...0,0243 МДж/м²·ч·°С, что ниже допустимых значений данного параметра для орошаемых насадочных скрубберов 0,038... 0,063 МДж/м²·ч·°С при скоростях газа в скруббере от 1 м/с и выше.

Проведен ряд исследований по зависимости степени очистки генераторного газа от скорости газа и способа подачи воды в комбинированный очиститель. С этой целью были изготовлены экспериментальные установки – скрубберы заданных сечений при сохранении размеров по высоте существующего очистителя с орошаемой насадкой – древесным углем с размером кусков 70 мм. Скорость газа была увеличена в 2 раза против скорости в существующем очистителе газогенераторной установки ЖНАЕУ табл. 2.

Таблица 2 Коэффициент очистки генераторного газа в комбинированном очистителе уменьшенного сечения при скорости газа 0,2 м/с

Table 2 Purification factor of generator gas in a combined scrubber with reduced cross-section at a gas velocity of 0,2 m/s

Влажность соломы W ^p , %	Расход воды, л/м³	Содержание примесей в газе, (г/м³)						Коэффициент очистки, (%)			
		До очистителя		После орошаемой насадки		После сухого очистителя		По механическим примесям		По смоле	
		механических	смолы	механических	смолы	механических	смолы	для мокрой насадки	общий	для мокрой насадки	общий
Высота орошаемой насадки 0,5 м											
20	15	0,84	0,092	0,321	0,063	0,283	0,049	61,8	66,3	31,5	46,7
25	20	0,92	0,108	0,35	0,058	0,291	0,046	62,0	68,4	46,3	57,4
Высота орошаемой насадки 1,5 м											
20	15	0,86	0,089	0,311	0,059	0,278	0,045	63,8	67,7	33,7	49,4
25	20	0,9	0,116	0,326	0,056	0,284	0,042	63,8	68,4	51,7	63,8

Полученные результаты показали увеличение количества механических примесей и смол в очищенном газе практически в два раза при максимально возможном расходе воды на орошение в спроектированном очистителе 20...25 л/м³. При этом обе ступени орошения не показали разницы в коэффициентах очистки. Если сравнивать полученные данные с показателями табл. 1, то общий коэффициент очистки, при таком же расходе воды 15 л/м³, влажности топлива 20 % и насадке из древесного угля понизился: по механическим примесям – с 81,8 % до 66,31 %; по смоле – с 69,1 % до 46,74 %. Это объясняется тем, что уменьшение сечения комбинированного очистителя в n раз соответственно уменьшает во столько же раз объем орошаемой ступени очистителя, а также сокращает в n раз площадь поля распыления воды, что более значимо для процесса очистки газа.

Последующие опыты были проведены с очистителем того же сечения, но с высотой орошаемой насадки равной 1,5 м. Этим объемом орошаемой насадки был увеличен в 1,5 раза по сравнению с объемом насадки комбинированного очистителя газогенераторной установки ЖНАЕУ. Данные табл. 2 по коэффициентам очистки и по содержанию механических примесей и смол свидетельствуют, что увеличение высоты и удельного объема насадки практически не улучшило степень очистки газа по сравнению с предыдущими опытами (табл. 1). Таким образом, при форсуночном распылении воды высота насадки не играет роли.

На долю очистки сухого очистителя приходится 5 – 10 % от общего количества уноса, поступающего из газогенератора. Его коэффициент очистки составляет 13...40 % при расчете, что за исходное количество уноса было принято унос, поступивший из мокрого очистителя в сухой. Скорость газа в сухом очистителе не должна превышать 0,2 м/с, поскольку ее увеличение приводит к росту сопротивления системы и коэффициент очистки газа снижается.

Для диаметра очистителя \varnothing 0,9 м и расхода газа 60...68 м³/ч, исходя из условия оптимальных сроков замены насадки, скорость газа в сухом очистителе рекомендуется принять 0,1 м/с.

Сухой очиститель выполняет функции, как дополнительной очистки газа, так и задержки остаточной влаги, которая поступает с газом из мокрой ступени очистки.

Исследовался также дисперсный состав уносов в газогенераторной установке ЖНАЕУ, работающей на соломе, с целью получить данные по его абразивным свойствам. В виду того, что полностью не удалось обессмолить пыль, зафиксировано слипание ее частиц, что в значительной степени влияло на погрешность эксперимента. Дисперсный состав пыли в процентах составил: при размере частиц 50...60 мкм – 56 %, 40...50 мкм – 12 %; 30...40 мкм – 8 %; 20...30 мкм – 7 %; 10...20 мкм – 3 %; 5...10 мкм – 10 %; 2,5...5 мкм – 4 %.

С целью косвенной оценки абразивных свойств уносов пыли были определены их зольные остатки, исходя из того, что в условиях работы двигателя

зольность частиц, так же как и качественная характеристика золы, в большей степени определяет износ его деталей.

Опытные данные свидетельствуют, что пыль, собранная в резервуаре с водой орошаемого насадочного скруббера, имеет зольность вдвое большую по сравнению с пылью, уносимой из газогенератора (64 % по сравнению с 33 %). Зольность пыли, прошедшей через очиститель равна 7 %. Выше изложенное свидетельствует о функции системы очистки в большей степени улавливать зольную часть уноса. С учетом количественного содержания загрязнений это дает коэффициент очистки газа по зольной составляющей выше 99 %.

Пыль, состоящая на 93 % из углеродосажистых частиц, находясь в газе в мелкодисперсном состоянии в небольшом количестве с достаточной полнотой должно сгорать либо в цилиндре ДВС, либо в горелках топочных камер, давая зольный остаток 7 %.

Таким образом, допустимые нормы загрязнений генераторного газа механическими примесями 20...30 мг/м³ при подаче его, например в ДВС [20], не являются обоснованными без учета качественной характеристики абразивности уноса.

Таблица 3 Фракционный состав смол, выделенных из газа после очистителя

Table 3 Fractional tar content, which have been allocated from the gas purification system

Номер фракции	Интервал температур кипения, °С	Количество фракций (на абсолютно сухую смолу), %
1	110-155	0,4
2	155-260	0,5
3	210-260	23,8
4	260-310	10,9
5	310-335	28,2
Хрупкий пек		30,7
Потери (газ)		5,5

Исследование фракционного состава смол и их физико-механических параметров, при газификации растительного сырья, показало, что начальная температура кипения смолы равна 210 °С. 28,2 % смолы выкипает в диапазоне температур 310...335 °С. Выше 335 °С смола перестает перегоняться, вспенивается и преобразуется в твердый хрупкий пек (30,7 %). Уже при температуре 270 °С от разложения смолы выделяются газы. Это свидетельствует о принадлежности смолы к категории высококипящих полимеризованных окисленных соединений, что является следствием ее прохождения через зону высоких температур (1200...1500 °С в зоне окисления газогенератора).

Негативные свойства смолы состоят в ее способности конденсироваться в газопроводящей системе и газораспределительных механизмах, выводя их из строя и образовывать нагары в цилиндрах ДВС или горелках топочных камер, если речь идет о зерносушилках. Поэтому, исследования, направленные на снижение уровня смол в генераторном газе, являются необходимыми для обеспечения нормаль-

ной работы, надежности и долговечности оборудования, работающего на нем.

В газогенераторной установке ЖНАЕУ количество смол в генераторном газе может быть достигнуто порядка 20...30 мг/м³, что является низким содержанием для того, чтобы вывести из строя работающее на нем оборудование. Такое низкое содержание смол в газе было достигнуто двумя мероприятиями: высокую степень крекинга смол было обеспечено новой конструкцией камеры газификации [16] и хорошие результаты по очистке газа от остаточных смол были достигнуты использованием комбинированного очистителя.

ВЫВОДЫ

1. В ходе исследования были испытаны три вида орошаемой насадки: древесный уголь, битый кирпич с размером кусков 70 мм и керамические кольца размером 50×50×5 мм, которые не показали значительной разницы по качеству очистки генераторного газа от смол и механических примесей, хотя показатель очистки газа достаточно высокий – 83,6 % по механическим примесям и 78,7 % по смолам при расходе воды на орошение 15 л/м³. Таким образом, при эксплуатации комбинированного очистителя генераторного газа при отсутствии древесного угля и керамических колец достаточно приемлемым их заменителем может служить битый кирпич. Фермер или сельхозпроизводитель, имеющий в хозяйстве газогенераторную установку, может сам выбирать тип орошаемой насадки из материала, который есть в наличии.

2. Оптимальным расходом воды на охлаждение газа является расход, равный 7 л/м³, а на очистку газа – 10...15 л/м³. Изменение геометрических параметров орошаемой насадки, в частности высоты с 0,5 до 1,5 м, не влияет на степень очистки генераторного газа. Увеличение скорости газа в комбинированном очистителе ухудшает очистку генераторного газа.

3. Дисперсный состав механических загрязнений свидетельствует, что комбинированный очиститель установки ЖНАЕУ не выполняет полную тонкую очистку генераторного газа, хотя максимально очищает газ от зольных абразивных частиц с коэффициентом очистки 99 %.

4. Основным компонентом загрязнений генераторного газа из растительного сырья после комбинированного очистителя (91...95 %) являются углеродисто-сажистые частицы с незначительной абразивной способностью, которые полностью сгорают как в цилиндрах ДВС, так и в горелках топочных камер зерносушилок и т.п.

5. При работе газогенератора на сырье растительного происхождения смола, содержащаяся в газе, поступающем в теплотехническое оборудование, отрицательно сказывается на его работе. Высокую степень крекинга смол было обеспечено новой конструкцией камеры газификации газогенераторной установки ЖНАЕУ, вместе с тем количество смолы

в очищенном генераторном газе после комбинированного очистителя достаточно низкое и не отражается на нормальной работе, как регулирующей аппаратуры, так и самого теплотехнического оборудования.

6. В связи с ростом цен на традиционные энергоносители все большее распространение получает оборудование, работающее на сырье растительного происхождения: пиролизные твердотопливные котлы, газогенераторы и т.п. Спроектированный в ЖНАЭУ комбинированный очиститель является достойной альтернативой дорогостоящему очистному оборудованию, обладающий высокими показателями по степени очистки генераторного газа, доступностью и простотой в обслуживании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Lin Wei-ji, Zhang Da-lei, Ren Yong-zhi. 2002.** Biomass gasification principles and applications. Biomass Gasification training course. Liaoning institute of energy resources. 56 – 66.
2. **White P.A.F., Smith S.E.** High-efficiency air filtration. London: Butter-worth, 185.
3. **Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. 2002.** Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. М.: Высш. шк., 912.
4. **Алиев Г.М. 1986.** Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочное издание. М.: Металлургия, 544.
5. **Батурин В.В. 1951.** Основы промышленной вентиляции. М.: Профиздат, 288.
6. **Вальдберг А.Ю., Сафонов А.Ю. 2006.** Анализ работы мокрых циклонов и пути повышения их эффективности. Хим. и нефтегаз. Машиностроение. № 7, 14.
7. **Вальдберг А.Ю., Мошкин А.А., Каменщиков И.Г. 2003.** Образование туманов и каплеулавливание в системах очистки газов. М.: Изд. дом «Грааль», 256.
8. **Голуб Г.А., Марус О.А. 2011.** Оптимизация параметров машин и оборудования. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Т. 13В, 15-19.
9. Завод газоочистного оборудования. Available online at: <<http://zgo.com.ua/home/kontakts.html>>
10. **Каменев П.Н. 1975.** Отопление и вентиляция. М.: Стройиздат, 483.
11. **Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрыбин Г.М. 1993.** Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. Л.: Химия, 320.
12. **Кухарец С., Шубенко В., Голубенко А., Цивенкова Н. 2013.** Обоснование рациональности использования продуктов газификации соломы в технологическом процессе сушки зерновых. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol.15. No5. 99–105.
13. **Куц В.П., Ярош Я.Д. 2004.** Батарейные циклоны. Повышение эффективности пылеулавливания. Химическая промышленность Украины. № 3. 48-51. (Украина).

14. Лось Л. В., Муляр О. Д., Голубенко А. А., Цивенкова Н. М. 2012. Особенности подбора оборудования для очистки генераторного газа Сб. док. межвуз. науч.-тех. конф., посв 90-летию ЖНАЭУ «Передовые технологии сельскохозяйственной продукции, энергосбережение и обеспечение тепловой и электрической энергиями. Перспективы и проблемы внедрения в сельское хозяйство Полесья». – Житомир: ЖНАЭУ. 102–108. (Украина).
15. Мойер Д., Фитц Р. 1940. Кондиционирование воздуха. / Под ред. П.Н.Каменева, Н.С. Комарова, И.В. Гохберга. Пер. с англ. М.-Л.: Пищепромиздат, 442.
16. Пат. 107219, Украина, МПК C10J 3/20, C10J 3/32, B01J 7/00, F23C 7/00. Способ формирования зоны горения и газификации и газогенератор для его осуществления / Цивенкова Н.М., Голубенко А.А.; заявители и патентодержатели Цивенкова Н.М., Голубенко А.А. – № а 2012 11797; заявл. 12.10.2012; дата публикации 10.12.2014, Бюл. № 23. (Украина).
17. Пат. 62320 Украина, МПК 7 B04C3/06. Циклон повышенной эффективности со ступенчатым отводом твердой фазы / Куц В.П., Марцияш О.М., Ярош Я.Д.; заявители и патентодержатели Куц В.П., Марцияш О.М., Ярош Я.Д. – № 2003031933; заявл. 04.03.200 ; дата публикации 15.12.2003, Бюл. № 12. (Украина).
18. Соколов В.Н. 1992. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи. / Под ред. В.Н. Соколова. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: Политехника, 327.
19. Сугак Е.В. 1999. Моделирование и интенсификация процессов очистки промышленных газовых выбросов в турбулентных газодисперсных потоках. Автореф. дис. докт. техн. наук: спец. 11.00.11. Красноярск, 46.
20. Сухомлин П.Н., Коузов П.А. 1955. Центробежные пылеотделители циклоны. М.: ОНТИ, 326.
21. Тарат Э.Я., Мухленов И.П., Туболкин А.Ф. 1977. Пенный режим и пенные аппараты. Л.: Химия, 304.
22. Тищенко Л., Харченко С., Гаек Е. 2014. К построению математической модели динамики запыленного воздушного потока в разработанном циклоне. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol.16. No7. 42–46.
23. Токарев Г.Г. 1955. Газогенераторные автомобили. М.: Машгиз, 207.
24. УкрНИИОГаз. Available online at:<http://niioogas.zp.ua/about_us.php>
25. Центр материаловедения. Available online at:<<http://mrc.org.ua>>
26. Цивенкова Н., Голубенко А., Кухарец С., Шубенко В. 2013. Определение основных параметров камеры газификации газогенератора на сырье растительного происхождения. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol. 15. No 4. 112–119.
27. Цивенкова Н.М. 2013. Обоснование параметров камеры газообразования газогенератора, адаптированного к сырью растительного происхождения. Автореф. дис. на соискание наук. ступени канд. техн. наук : спец. 05.05.11. Киев, 24. (Украина).
28. Чекалов, Л.В. 2008. Формула газоочистки. Ярославль: Кондор-Эко, 275.

THE INVESTIGATION OF THE TECHNICAL SPECIFICATIONS OF GAS GENERATOR PURIFICATION SYSTEM

Summary. The research results of technical specifications of generator gas (received from vegetative raw materials) purification system have been presented in the paper. The system is supposed to purify gas from mechanical impurities and tars in experimental installation equipped by downdraft gas producer at Zhytomyr national agroecological university. The gas purification system consists of wet scrubber and dry refinement with filled-in materials.

The variation of gas purification factor with: water flow rate for cooling and purifying for several types of irrigated complements; gas velocity in scrubbers for scrubbers with various cross-sections; complement height and its specific volume have been investigated during the research.

The dispersion and abrasive dust compositions as well as fractional tars composition in gas before and after the purification have been determined. The possibility of receiving generator gas with low tars content (20...30 mg/m³), due to the designed purification system, that provides high exploitation rates of thermotechnical equipment has been proved.

Purification factor of more than 99% for abrasive ash particles was obtained. Remaining mechanical impurities in generator gas are by 91-95% consists of carbon ash particles, possessing minor abrasive properties, that can be safely burnt in grain dryer's furnaces as well as in internal combustion engines.

The designed combo purifying system turned to be a simple and efficient method of purification from mechanical impurities and tars; it possesses small aerodynamic resistance, features construction simplicity and is an inexpensive alternative to the expensive purifying equipment under the conditions of small agricultural enterprises.

Key words: gas producer, generator gas, biomass, gas cooling system, gas purification system.