

**Автоколебания при горении твердого топлива загрязненного  
радионуклидами**

**Ю.В. Полежаев, В.Д. Гешеле, И.П. Раскатов, В.Н. Соловьев, И.Г. Плещанков,  
Л.А. Бида, А.С. Левчук, Г.И. Фокина/  
(ОИВТ РАН, Москва, ОИЭЯИ-Сосны, Минск)**

**Введение**

Впервые процесс самовозбуждения термоакустических колебаний газа рассмотрен в работах Хиггинса и Рэля [1].

Мощные колебания давления и температуры, сопровождающие этот процесс в камерах сгорания энергетических установок, зачастую приводят к разрушениям элементов конструкции. Наблюдаются, например, прогорание стенок жаровой трубы камеры сгорания или её коробление. В случае двигателей летательных аппаратов подобные явления могут привести к тяжелым авариям. Такие случаи известны в авиации [2].

С другой стороны, при вибрационном горении увеличивается теплонапряженность топочного объема, улучшается теплоотдача к стенкам топки, увеличивается полнота сгорания. Несомненно, такие свойства вибрационного горения являются привлекательными при разработке различных энергонапряженных топочных устройств.

Подавляющее большинство исследований, как в теоретическом, так и в экспериментальном плане, посвящено вибрационному горению газообразного и жидкого топлива. Полученные расчетные закономерности, накопленный опыт и экспериментальные результаты этих исследований не могут быть применены без корректировки при конструировании топков для твердого топлива. Для этого требуются специальные исследования, учитывающие специфику сжигания твердого топлива посредством вибрационного горения. В изучении этого вопроса следует отметить работы Казанской школы [3,4].

**Система диагностики и методика экспериментального исследования**

Была проведена серия опытов по изучению вибрационного горения. Опыты проводились на установке типа "Трубы Рийке".

В кварцевой трубе длиной 100 см и диаметром 100 мм, вертикально расположенной, размещалось твердое топливо (рис.1). Изучалось горение различных сортов твердого топлива: древесина, древесный уголь, древесные пеллеты, сухой спирт.

Система диагностики позволяла проводить измерения характеристик акустического процесса, сопровождающего горение, - амплитуды звукового давления и частоты. Замерялись скорость выгорания топлива; скорость засасываемого воздуха; температура продуктов горения. Проводилась киносъемка пламени. Показания приборов выводились на компьютер и обрабатывались в синхронном режиме.

Погрешности измерений составили: частота  $\pm 2$ Гц; уровень звукового давления  $\pm 1$ дБ; температура продуктов горения  $\pm 5$ К; местоположение зоны горения  $\pm 0,1$ см; скорость поступающего в трубу воздуха  $\pm 1$ см/сек; скорость выгорания топлива  $\pm 20$  мг. Киносъемка осуществлялась со скоростью 60 и 500 кадров/с.

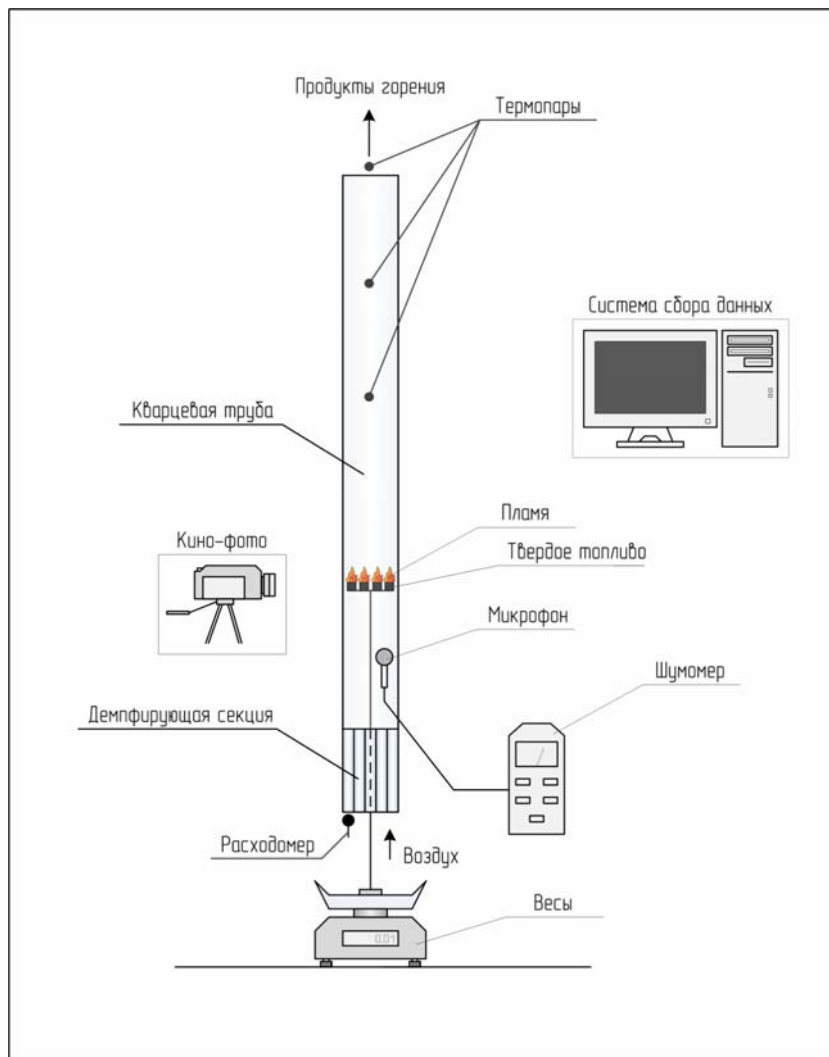


Рис.1 Схема установки для исследования акустических характеристик вибрационного горения твердого топлива в трубе Рийке.

Была проведена серия опытов на определение зависимости амплитуды и частоты колебаний от положения в трубе зоны горения (рис.1). При этом исследовались различные виды топлива (сухой спирт, древесина, древесный уголь, пеллеты). Видно, что амплитуда основной гармоники практически не меняется со временем  $\sim 5$  мин и затем резко падает.

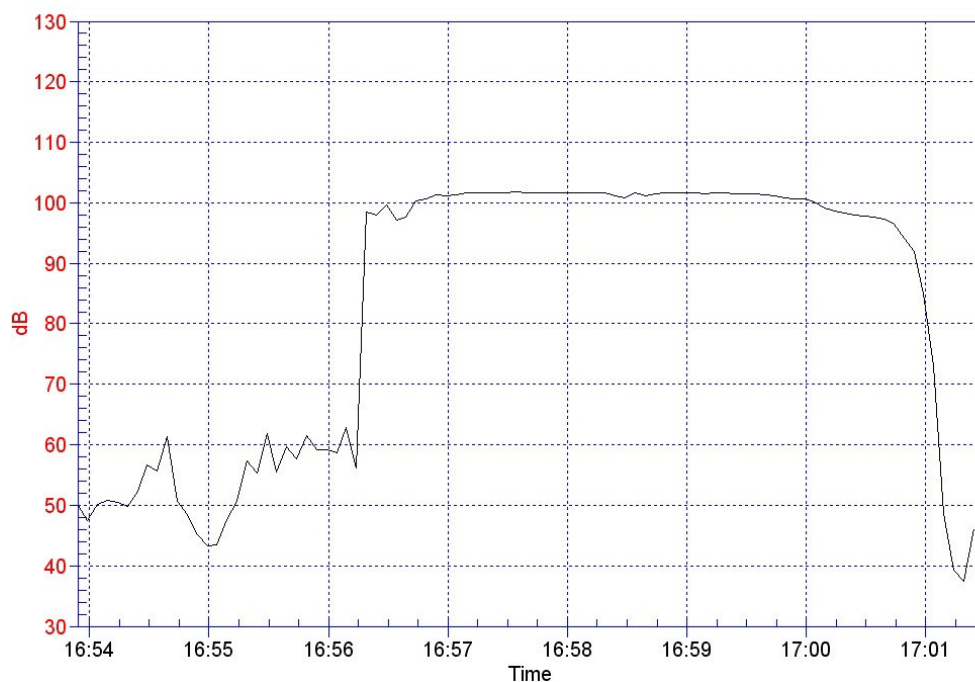
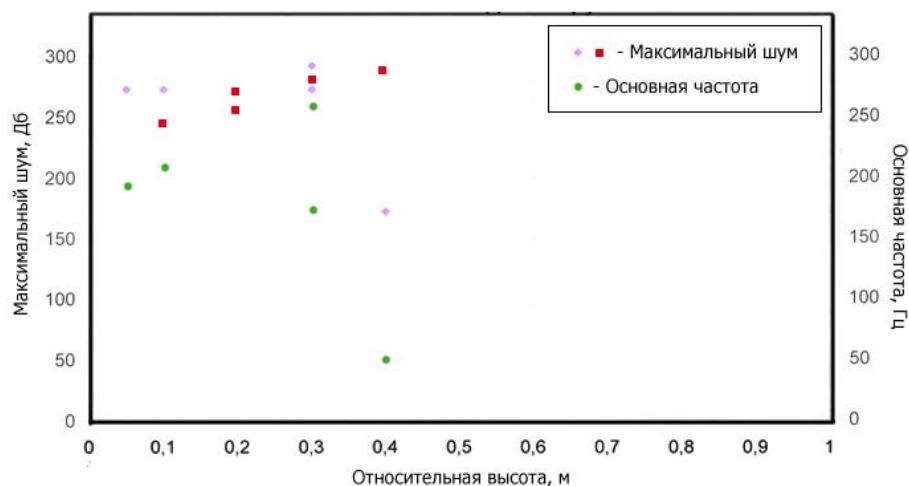


Рис. 2. Изменения уровня звуковых колебаний во времени при горении сухого спирта

Результаты обработки опытов при горении спирта относительно максимальной амплитуды и соответствующей частоты колебаний приведены на (рис.2,3). Таблетки спирта делились на 4 части и 8 частей. По мере перемещения зоны горения вверх от нижнего конца трубы амплитуда колебаний несколько нарастает до положения  $\frac{x}{L} = 0,3 - 0,4$  относительной длины и затем резко падает. При этом для более мелких фракций (1/8 таблетки) зона интенсивных автоколебаний несколько увеличивается (до



значения 0,4).

Рис. 3. Зависимость максимального звукового давления и частоты колебаний от относительного положения зоны горения: квадратные значки – 1/8 таблетки, ромбы – 1/4

Записывалось изменение массы топлива во времени (рис.4), по которому определялась скорость выгорания топлива в процессе горения.

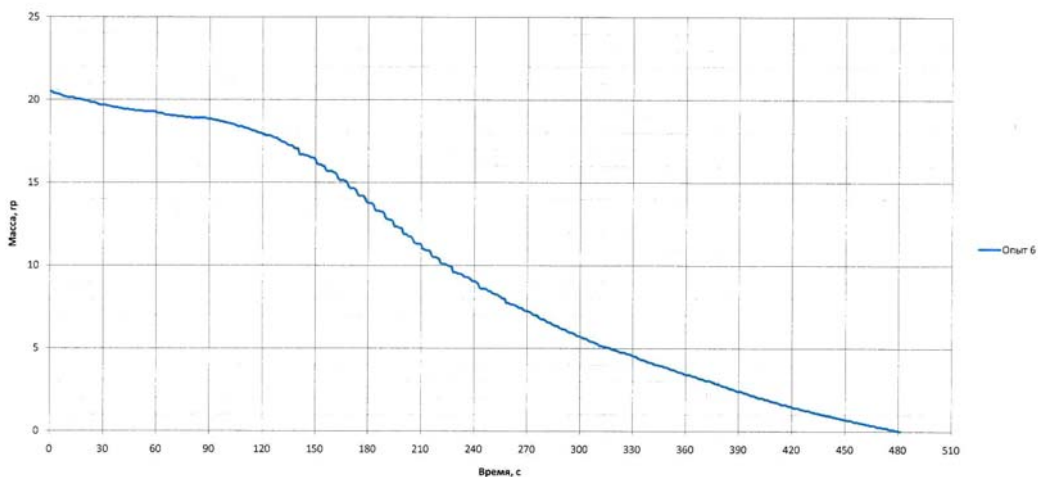


Рис. 4. Скорость выгорания древесного угля

Характерные диаграммы типового опыта при горении древесного угля показаны на рис. 5.

Следует отметить, что помимо основной гармоники с амплитудой  $\sim 80$  dB и частотой  $\sim 180$  Hz имеет место набор гармоник с частотой до и более 1000 Hz. Изменение амплитуды колебаний имеет переменную величину и ростом частоты постепенно уменьшается.

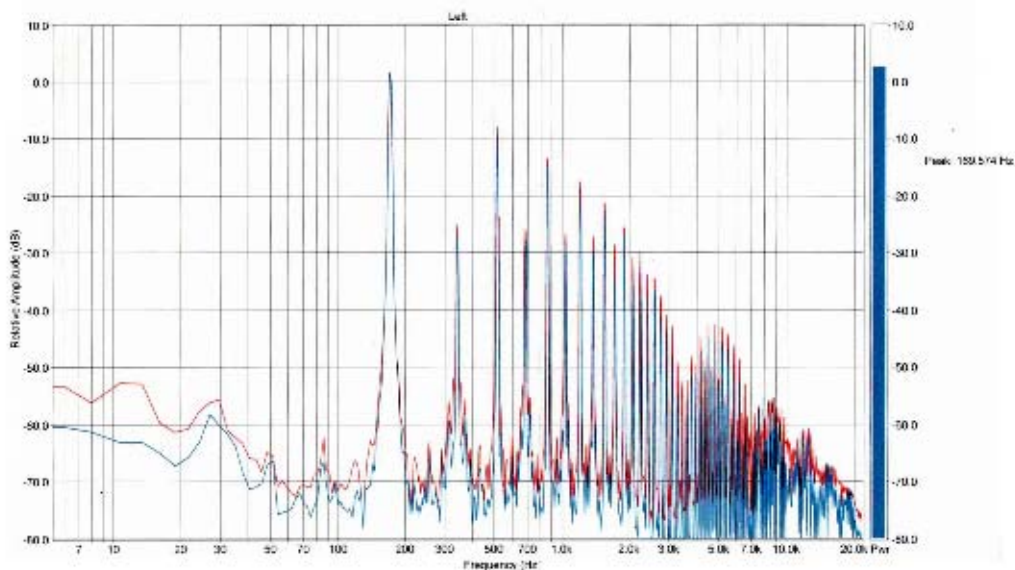


Рис. 5. Спектр колебаний давления при горении сухого спирта

В результате анализа значительного числа диаграмм для различных сортов топлива, места положения зоны горения, структуры топлива, укладки топлива, интенсивности выгорания можно сделать следующий вывод. Автоколебательный процесс горения имеет схожий с вышеотмеченным характер, т.е. помимо основных гармоник, сопровождающихся слышимым звуком, имеется набор гармоник более высокой частоты с уменьшающейся амплитудой. Объяснить весь процесс возникновения и развития вибрационного горения с позиций "энергетического" подхода не представляется возможным. Низкочастотные колебания основных гармоник хорошо объясняются с "энергетической" позиции, наиболее популярной в настоящее время. Автоколебания более высокой частоты, по-видимому, генерируются вихревыми процессами, возникающими в газовом потоке продуктов горения на границе пламени.

Эти процессы требуют более детальных экспериментальных и теоретических исследований. В этом направлении нами были проведены следующие опыты.

При загрузке топливом - древесным углем в центре загрузки помещался фрагмент пеллеты хвойных пород. По мере разгорания угля и возникновения вибрационного процесса горения, сопровождающегося акустическим излучением, в центре зоны горения формировался "флажок" пламени диффузионного горения пеллеты. При интенсивном вибрационном горении проводилась киносъемка, из рассмотрения которой отчетливо видны на "флажке" волны (рис.6). Опыты были проведены многократно и всякий раз на «флажке» формировались волны длиной ~ 10 мм.

Расчетная частота таких волн значительно выше основных гармоник. По-видимому, объяснить их возникновение можно вихревыми процессами, возникающими в газовом потоке продуктов горения твердого топлива на границе с пламенем.

Пожалуй, наиболее популярным в настоящее время анализом условий возбуждения термоакустических колебаний газа является «энергетический» подход [1]. Его суть заключается в следующем. Бесконечно малые акустические возмущения в газе усиливаются, если акустическая энергия, генерируемая тепловым источником, например, процессом горения, больше её потерь. При этом должен выполняться «Критерий Релея», который формулируется так. Если фазовый сдвиг между колебаниями давления и колебаний скорости теплоподвода по абсолютному значению меньше  $\pi/2$ ; колебания возбуждаются, если фазовый сдвиг лежит в пределах от  $\pi/2$  до  $\pi$  колебания гасятся. Привлекательным является физическая наглядность этого подхода. Но для его реализации необходимо определить обратную связь между пульсациями давления газа и тепловыделением.

С целью верификации этого предположения нами был выполнен следующий опыт. К нижнему концу трубы приставлялся съемный участок, представляющий собой секцию 120 мм трубы того же диаметра, что и основная труба. Полость секции заполнялась набором трубок диаметром 3 мм (рис. 1). Опыт проводился на трубе диаметром 40 мм и длиной 100 см. Таким образом, удалось «сгладить» пульсации скорости засасываемого в процессе горения воздуха в трубу. Скорость засасываемого воздуха на входе в "демпфирующий" участок и без него измерялась чувствительным расходомером.

В результате анализа полученных результатов опыта было установлено, что при возникновении и развитии вибрационного горения при подведении "демпфирующей" секции автоколебательный процесс резко прекращается и пламя приобретает диффузионный характер. При отводе секции вибрационное горение быстро восстанавливается. Опыт был проведен на различном топливе, в разных положениях зоны горения, с различной загрузкой. Обязательным условием опыта было наличие устойчивого вибрационного горения. Результат идентичен отмеченному.

Отсюда можно сделать вывод, что "энергетический" подход приемлем, и может быть применен для описания процесса вибрационного горения, сопровождающегося основными гармониками автоколебательного процесса. Для этого разработан расчетный метод с отысканием «передаточной» функции [3,4]. Необходимо разработать математическое описание вихревых процессов, генерирующих более высокочастотное акустическое излучение.

Анализ топочных устройств позволяет сделать вывод, что эффективным способом сжигания древесины является процесс горения с наложенными акустическими колебаниями. Камера сгорания должна обладать характеристиками термоакустического резонатора, в котором возникают стоячие звуковые волны.



Рис. 6. Флажок диффузионного пламени пеллеты при вибрационном горении древесного угля

При этом при определенных условиях изменяются параметры пламени: снижается температура, пламя вибрирует и принимает голубой оттенок, укорачивается длина пламени, увеличивается теплоотдача на стенках камеры сгорания. Отмеченные эффекты могут привести к снижению выхода  $^{137}\text{Cs}$  в летучей фазе и повышению её концентрации в зольном остатке при сжигании древесины и торфа загрязненных радионуклидами.

Нами были проведены опыты на лабораторной установке типа трубы Рийке. Исследовался процесс горения пеллет хвойных пород древесины. В процессе эксперимента наблюдалась как диффузионное, так и вибрационное горение пеллет в кварцевой трубе длиной 100 см и диаметром 10 см. Изменялись скорость выгорания, температура пламени, частотные амплитудные характеристики термоакустических излучений, велась киносъемка процесса горения. Температура пламени при диффузионном горении составляла  $\sim 1100^\circ\text{C}$ . При возникновении жёсткого вибрационного горения, сопровождающегося резким увеличением амплитуды термоакустических колебаний, факел сокращался, пламя турбулизировалось, цвет от оранжевого приобретал синий оттенок. При этом температура пламени снижалась до  $\sim 700^\circ\text{C}$ . Скорость же выгорания несколько увеличивалась, что возможно связано с акустическим излучением и ростом теплоотдачи к стенкам камеры сгорания, обусловленного турбулизацией пристенных слоев продуктов горения. Эффекты интенсификации процесса и снижение температуры пламени могут быть использованы в практических целях при утилизации биотоплива, загрязненного радионуклидами..

Процессы термической обработки древесного топлива, загрязненного радионуклидами Чернобыльского выброса и глобальных выпадений, - пиролиз газификация, сжигание представляют практический интерес, так как из-за малой

зольности древесины в зольных отходах происходит концентрирование активных изотопов и зола может стать опасным  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -излучателем категории РАО - «радиоактивные отходы». Часть активности может выбрасываться с золой уноса и дымовыми газами в атмосферу, создавая вторичное загрязнение окружающей среды. Основную радиэкологическую опасность при утилизации древесного топлива и отходов лесных территории в настоящее время и на среднесрочную перспективу представляет изотоп  $^{137}\text{Cs}$ , активность которого в биотопливе и в золе наибольшая.

Концептуально примем, что при сжигании радиоактивного топлива значительная доля изотопа  $^{137}\text{Cs}$  фиксируется в топливе и в зольных остатках топлива в различных химических соединениях с максимальной температурой плавления, часть изотопа перейдет возгонкой или с летучей золой в газовую фазу и покинет реакционную зону с топочными газами. Технологически и экологически предпочтительней представляется максимальная фиксация активности в зольных отходах топки и минимальный вынос в газоходы и в окружающую среду. Сравнительный анализ температур плавления различных соединений цезия дает основание моделировать условия, которые способствуют образованию тугоплавких соединений, например сернокислого цезия  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ , у которого  $T_{\text{пл}}=1288\text{ K}$ . Необходимым условием образования данного соединения является наличие в топливе серы.

Оптимизация параметров топочного режима, при которых обеспечивается максимальную степень фиксации радионуклидов в зольных остатках и минимальных их вынос с газовой фазой в первом приближении может быть рассмотрена расчетным путем на основе термодинамики равновесных систем.

На первичном этапе исследований изучалось распределение  $^{137}\text{Cs}$  в продуктах пиролиза-газификации загрязненного радионуклидами древесного топлива расчетным и экспериментальным путем.

Численные расчеты поведения цезия выполнены в состоянии химического равновесия при пиролизе-газификации загрязненной  $^{137}\text{Cs}$  биомассы. В расчетах содержание кислорода ограничено  $\text{O}_2 < 2,2\%$ , диапазон температур  $900 - 2000\text{ K}$ , содержание серы в топливе до  $0,5\%$ . Модель поведения цезия в топке-газогенераторе учитывала только те химические реакции, в которых участвует  $\text{Cs}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ . При расчетах учитывались химические реакции 10 основных соединений кислорода,

водорода, серы, цезия (в том числе соединений цезия:  $\text{Cs}$ ,  $\text{CsOH}$ (конд), водорода, серы, цезия (в том числе соединений цезия:  $\text{Cs}$ ,  $\text{CsOH}$ (конд),  $\text{CsOH}$ (газ),  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ (конд),  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ (газ).

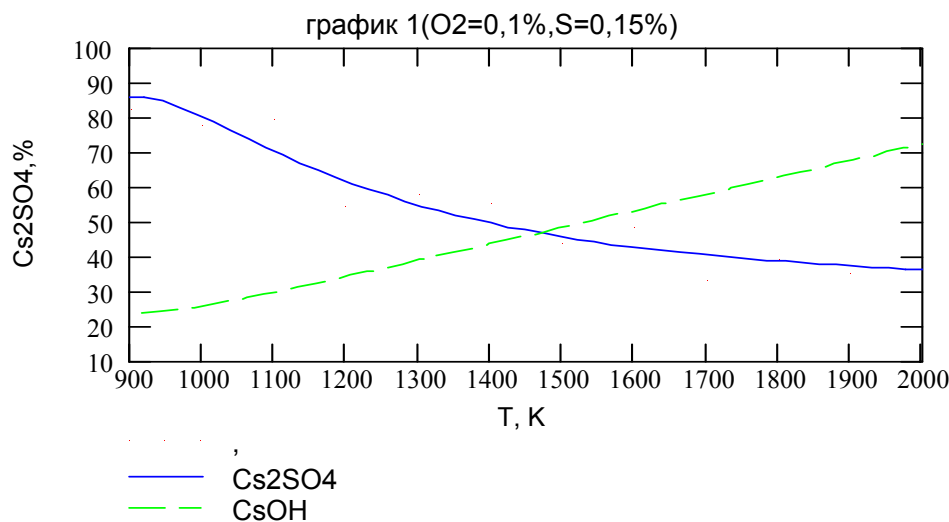


Рисунок 7. Соотношение образующихся соединений  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$  и  $\text{CsOH}$  от

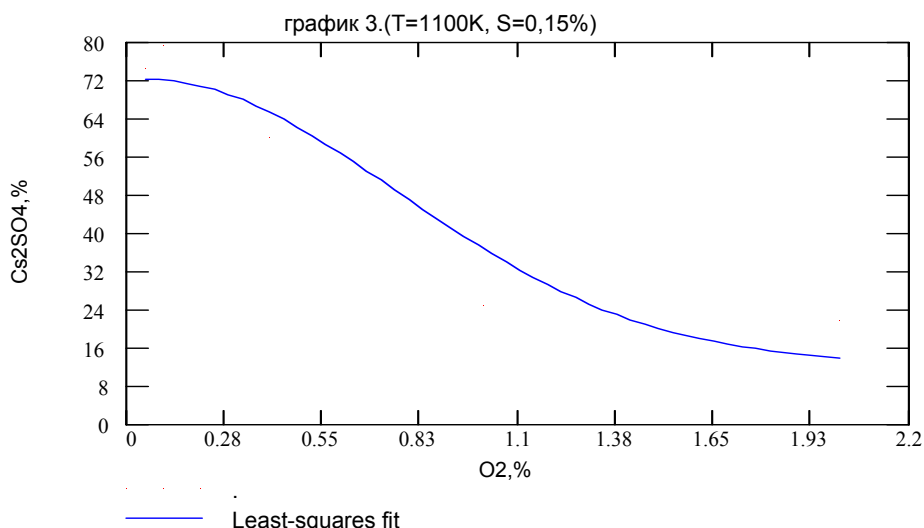


Рисунок 8. Зависимость образующегося соединения  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$  от содержания кислорода при условиях  $T=1100\text{K}$  и  $S=0,15\%$ .

При этом учитывалось, что максимальный вынос цезия вероятен в соединении гидроксида с низкой температурой возгонки  $\text{CsOH}$ (газ), а наибольшая фиксация в твердой фазе – в форме сернокислого цезия  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ (конд). Результаты расчетов показаны на рисунках 7,8,9.

Из представленных графиков следует существенное влияние на выход газов  $\text{CsOH}$ (газ) и на максимальную долю твердых (конденсированных) соединений  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$  температуры, содержания кислорода и серы. При пиролизе-газификации содержание свободного кислорода существенно влияет на процесс образования  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ , снижая его концентрацию с увеличением доли кислорода в реагентной смеси. При фиксированном значении температуры и концентрации свободного кислорода проведен анализ влияния содержания свободной серы с изменением концентрации серы в исходной смеси от 0,01% до 0,5%. на образование сернокислого  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ .

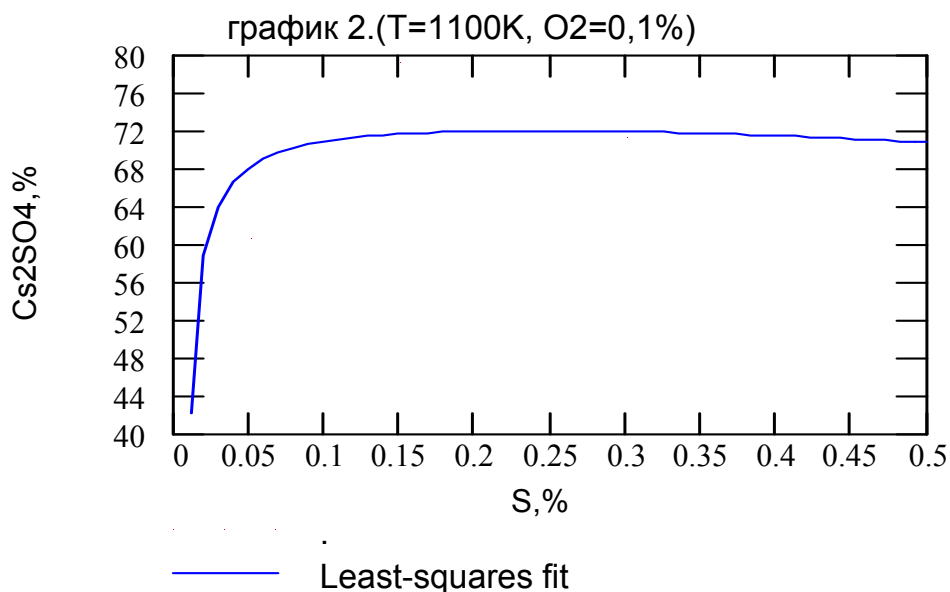


Рисунок 9. Зависимость образующегося соединения  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$  от содержания серы при условиях  $T=1100\text{K}$  и  $\text{O}_2=0,1\%$ .



Наиболее существенно влияние серы в области концентраций до 0,05%, с увеличением концентрации более 0,1% влияние серы на образование  $Cs_2SO_4$  достигает области автомодельности.

Таким образом, максимальная концентрация соединения  $Cs_2SO_4$  и, соответственно наименьший выход радиоцезия в газовую фазу, образуется в области температур обработки 900 – 1100К, при минимальном количестве свободного кислорода и содержании серы выше определенного порогового значения ( $Cs > 0,1\%$ ). Такие параметры характерны для процессов пиролиза-газификации и, частично, для газогенераторных топок.

Результаты расчета были экспериментально подтверждены в исследованиях процессов пиролиза-газификации образцов древесины из «рыжего леса» вблизи ЧАЭС в статье /5/, в которой показана фиксация изотопа  $^{137}Cs$  в зольно-угольных отходах в диапазоне (85-97)%.

Применительно к технологии энергетического использования загрязненной  $^{137}Cs$  биомассы были выполнены численные расчеты поведения цезия в состоянии химического равновесия при сжигании древесного топлива. Численные расчеты проводились в диапазоне температур 1100 – 2000 К при различных коэффициентах избытка воздуха  $\alpha$  и различном содержании серы.

Результаты расчетов при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1$  и исходном количестве элементарной серы от 0 до  $3,96 \cdot 10^{-5}$  моль показано на рисунках 4,5,6.

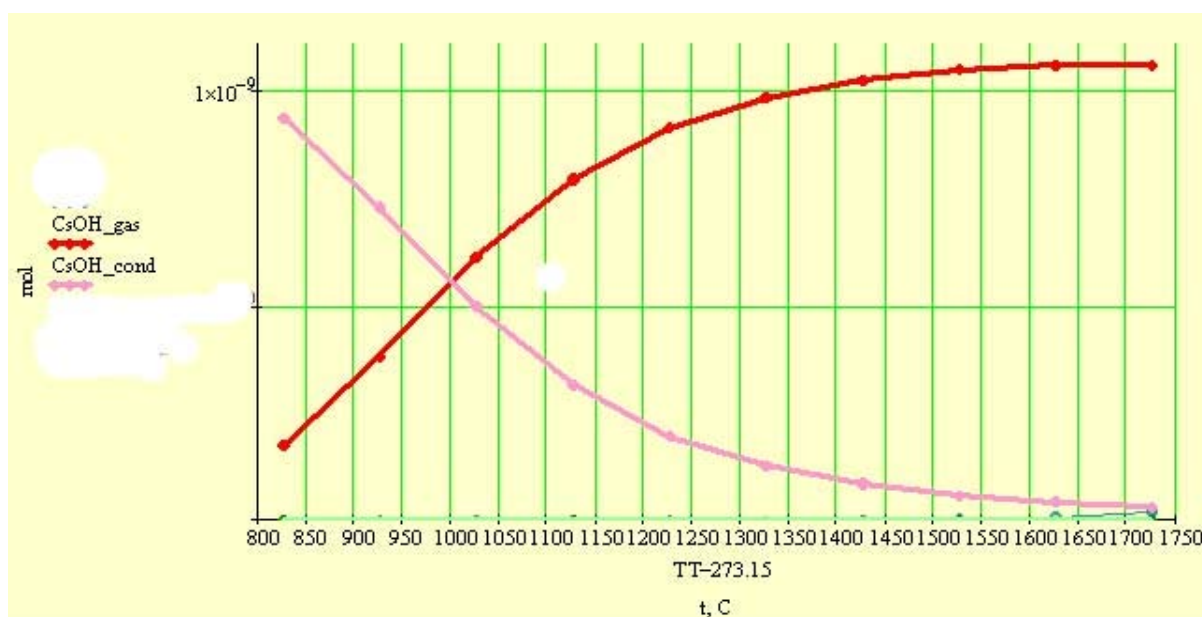


Рисунок 10. Расчет образующихся соединений Cs в состоянии равновесия в диапазоне температур 1100 – 2000 К при сжигании загрязненной радионуклидами древесины с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1$  (при исходных данных  $S = 0$  моль,  $H = 0,20$  моль,  $O = 0,23$  моль,  $Cs = 1,11 \cdot 10^{-9}$  моль).

Расчеты показывают, что при сжигании загрязненного  $^{137}Cs$  древесного топлива с содержанием серы  $S^r = 0,05\%$  биомассы с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1 - 3$ , в области температур газовой смеси около 950°C и ниже преобладающим соединением цезия является  $Cs_2SO_4$  в конденсированной фазе, с увеличением температуры доля  $Cs_2SO_4$  снижается и растет содержание гидроокиси CsOH, которая при температуре

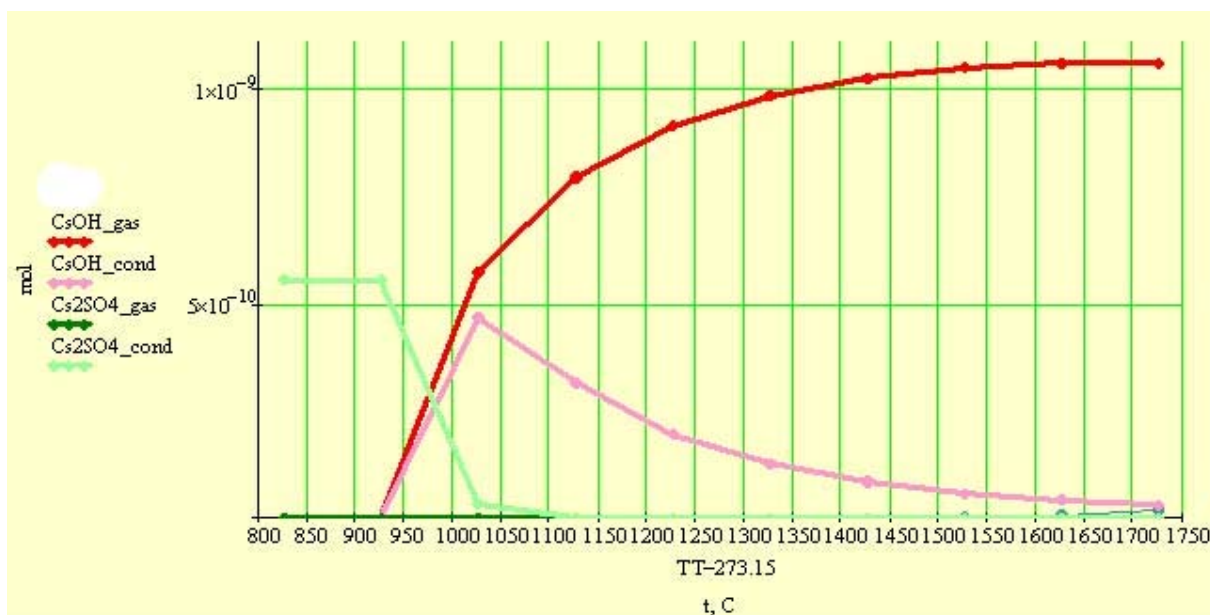


Рисунок 11. Расчет образующихся соединений Cs в состоянии равновесия в диапазоне температур 1100 – 2000 К при сжигании загрязненной радионуклидами древесины с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1$  (при исходных данных  $S = 3,96 \cdot 10^{-5}$  моль,  $H = 0,20$  моль,  $O = 0,23$  моль,  $Cs = 1,11 \cdot 10^{-9}$  моль).

около 1000°C состоит в равных долях из газовой и конденсированной фазы. С ростом температуры доля конденсированной фазы CsOH уменьшается, а доля газовой фазы CsOH соответственно растет. При температурах выше 1600°C происходит заметное образование атомарной формы цезия.

Распределение активности  $^{137}\text{Cs}$  при сжигании биомассы (древесное топливо – опилки) при различных температурах в топочном пространстве было выполнено экспериментально. Опыты проведены в лабораторной установке с моделированием топочного режима реальных котельных установок на древесном топливе. Лабораторная установка сжигания представляет собой топочное устройство ( $V=0,0037 \text{ м}^3$ ) с неподвижной колосниковой решеткой, вертикальной периодической загрузкой топлива, дутьем воздуха под колосниковую решетку, а также вспомогательное оборудование. В опытах поддерживались низкая напряженности зеркала горения (или тепловая мощность топки), коэффициент избытка воздуха  $\alpha \approx 1,4$  и с помощью внешнего обогрева варьировалась температура горения от 547 до 875 °C.

После проведения каждого эксперимента гамма-спектрометрическим методом определялась активность проб: в подовой золе, в отложениях в теплообменнике, в крупнодисперсных фракциях золы уноса (в насыпных фильтрах) и в мелкодисперсных фракциях и аэрозолях золы уноса (в фильтрах АФА).

В результате проведения экспериментов получен рост активности крупнодисперсных и мелкодисперсных фракций золы уноса с ростом температуры.

Изменение активности  $^{137}\text{Cs}$  покидающей топку с уносом (крупнодисперсными фракциями уноса в насыпных фильтрах и мелкодисперсными фракциями уноса и аэрозолями на фильтрах АФА) в зависимости от температуры показано на рисунке 12.

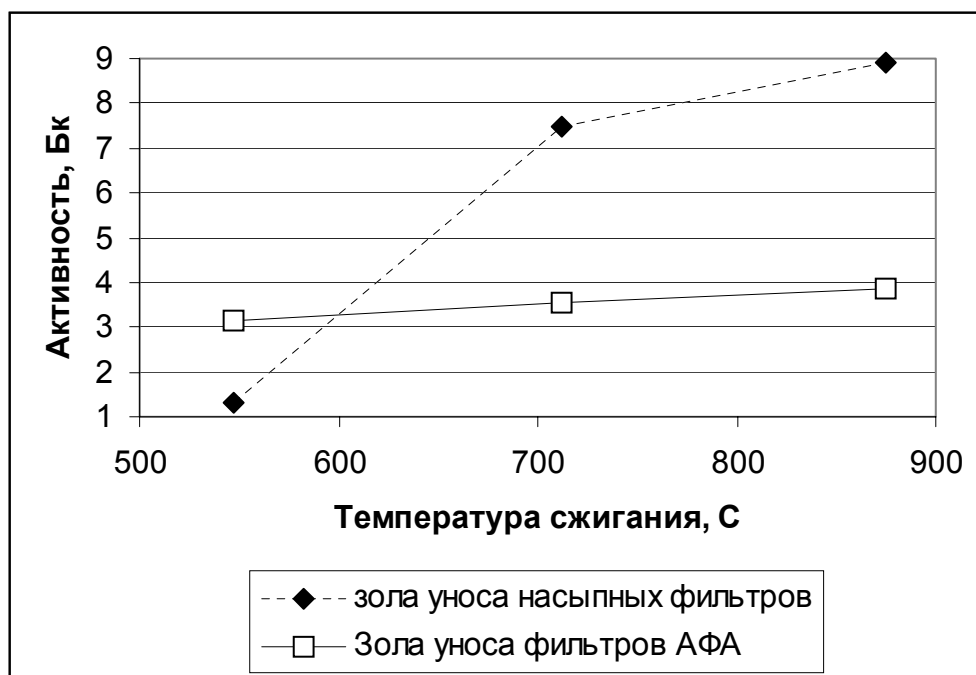


Рисунок 12 - Изменение активности  $^{137}\text{Cs}$  покидающей топку с уносом в зависимости от температуры сжигания

Полученные результаты свидетельствуют о возможности оптимизации параметров топочного режима, в том числе температуры, при которых обеспечивается максимальная степень фиксации радионуклидов в зольных остатках и минимальных их вынос с газовой фазой.

### Заключение

1 Проведено экспериментальное исследование термоакустических характеристик вибрационного горения твердого топлива.

Получены экспериментальные характеристики автоколебательного процесса вибрационного горения древесины, древесного угля, пеллет и сухого спирта.

В результате анализа полученных осциллограмм амплитудных характеристик в зависимости от положения зоны горения в трубе Рийке, сорта и структуры топлива сделано следующее предположение. При вибрационном горении твердого топлива существуют два типа процесса. Для основных гармоник колебательного процесса (первая - третья) – известный в литературе «энергетический» подход; для гармоник более высокой частоты – «вихревой механизм».

2 Разработаны и применены методы экспериментальной верификации этого предположения с помощью «демпфирующей» приставки и «флажков» диффузионного пламени при вибрационном горении твердого топлива.

3. Отмечено снижение температуры пламени при возбуждении вибрационного горения, увеличивается интенсивность горения и теплоотдача к стенкам камеры.

4. Отмеченные эффекты могут привести к изменению распределения активности в летучей фазе и в зольном остатке, например, при вибрационном горении загрязненной радионуклидами биомассы. Проведено исследование распределения изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в зольных отходах и продуктах пиролиза-газификации-сжигания загрязненного радионуклидами древесного топлива в зависимости от температуры процесса, содержания кислорода и серы в реагентной смеси.

## Литература

- 1 Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. М.: Изд. ФизМат лит., 1961.
- 2 Козырев В.Т. Автоколебательная аэротермоакустика газотурбинных двигателей. Изд. МГТУ им. Баумана, 2005.
- 3 Ларионов В.М., Зарипов Л.Г. Автоколебания газа в установках с горением. Казань: Изд. ГТУ, 2003.
- 4 Филиппов С.Е. Механизмы возбуждения и теоретические модели колебаний газа в установках пульсационного горения твердого топлива. Диссертация к.т.н. Казань, 2008.
- 5 Экспериментальное исследование распределения изотопов  $^{137}\text{Cs}$  в продуктах пиролиза и газификации древесных радиоактивных отходов./ В.Н. Соловьев, Л.А. Бида, А.С. Левчук, Л.И. Хилько, Г.И. Фокина // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-тех. Наук. – 2000. - №3, с. 130-135.