УТВЕРЖДАЮ:
Директор ООО «КАМИ»
_____ С.И.Серегин
“ 14 ” апреля 2011г.

КОТЕЛ ОТОПИТЕЛЬНЫЙ КИК-18

Отчет по совместным испытаниям

СОГЛАСОВАНО:
члены рабочей группы

письмом от 13.04.2011 Е. В. Колчин

письмом от 12.04.2011 С.И. Несов

письмом от 12.04.2011 А.Ф. Бацулин

12.04.2011 С.В. Кириллов

Полушкино
2011

1. Введение

В период с 01 по 10 марта 2011 года в п. Полушкино (Московская обл.) проводились испытания отопительного котла КИК-18.

Внешний вид котла показан на рис.1. Внутреннее устройство котла показано на рис. 2 и 3.

Рис.1. Внешний вид котла КИК-18

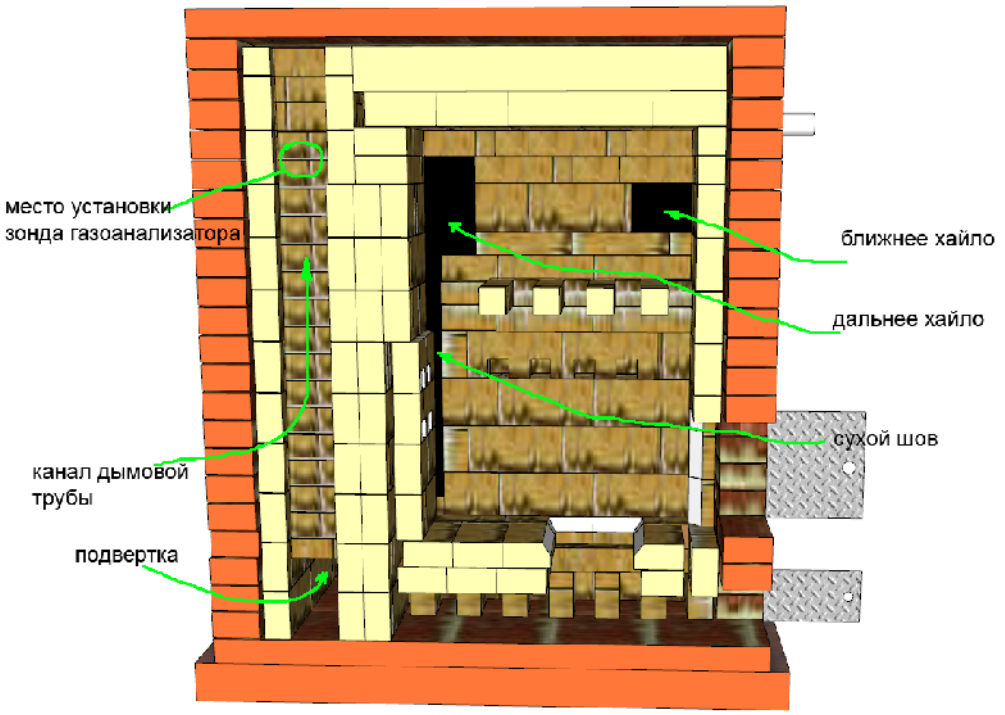

Рис.2. Разрез котла по топке

Конструктивно котел состоит из одного колпака, разделенного на две полости – топку и полость размещения водяного регистра.
Топка соединяется с полостью водяного регистра вертикальной щелью шириной 3см, т.н. сухим швом и двумя хайлами (см. рис.2). Из полости водяного регистра дымовые газы уходят вниз в подвертку и далее – в дымовую трубу (см. рис.3).

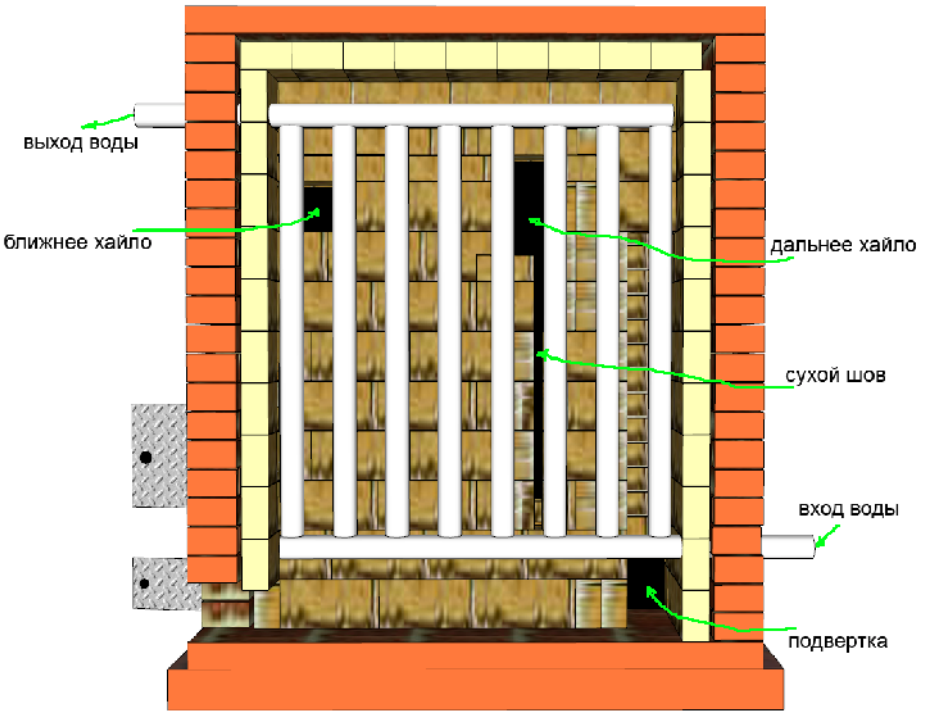

Рис.3. Разрез котла по полости водяного регистра

Цель испытаний: Экспериментальное подтверждение преобладания принципа свободного движения газов (далее СДГ) над принципом принудительного движения газов (далее ПДГ) в печах системы Кузнецова.

Ожидалось, что при реализации принципа СДГ наиболее горячие дымовые газы свободно поднимутся вверх и равномерно заполнят отсек с регистром, поступая на регистр через оба хайла. Наиболее холодные газы, при этом, будут свободно стекать в сухой шов, не разбавляя основной поток горячих газов и не снижая температуру рабочего тела (основного потока горячих газов).

Таким образом, ключевым моментом является наличие в системе сухого шва. Также возможно и влияние места расположения хайла на равномерность распределения потока горячих газов по отсеку с регистром.

Параллельно с оценкой эффективности работы колпака проводилась и оценка работы котла "в целом". Для этого замерялись параметры газового потока на выходе из котла и объемы потребляемого воздуха, на входе в котел.

В процессе испытаний оценивалось:

– влияние сухого шва на эффективность теплопередачи "по воде",
- влияние расположения хайла на эффективность теплопередачи "по воде",
- влияние сухого шва на потери тепла с отходящими газами.

Всего было задействовано три схемы организации топочного процесса:

- котел КИК-18 "как есть", т.е. в авторском исполнении;
- котел с закрытым сухим швом;
- котел с закрытым сухим швом и с закрытым дальним хайлом.

Результаты испытаний приведены на соответствующих графиках и в таблицах.

2. Подготовка к испытаниям

Для контроля теплоотдачи котла "по воде" на горизонтальном участке трубопровода были установлены ультразвуковые датчики расходомера-счетчика жидкости накладного "DYNAMETERS" (Китай) и датчики температуры на входе в регистр и на выходе из него (см. рис.4 и 5).

Рис.4. Комплект приборов "по воде"

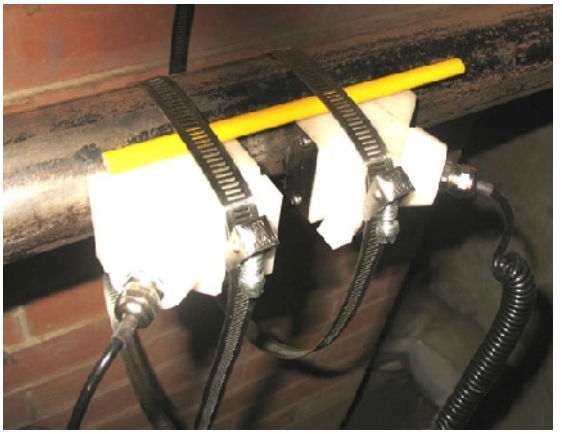

Рис.5. Ультразвуковые датчики расхода

Для контроля состава отходящих газов и их температуры был использован газоанализатор Delta 65 фирмы MRU (Германия). Расположение газоанализатора на котле показано на рис.6.

Рис.6. Место размещения газоанализатора

Для контроля входящего воздуха на патрубке поддувала был установлен термоанемометр импеллерный типа Skywatch Xplorer 2 швейцарской фирмы JDC Electronic SA (см. рис.7).

Рис.7. Патрубок с установленным анемометром

Во всех опытах сжигалось по 26кг дров за две закладки. Схема сжигания: 13кг + 13кг. Средняя влажность дров W = 15,2% (Определение влажности см. в разделе 3.3.1) . Состав – береза. Подкладывание следующей закладки дров осуществлялось при снижении концентрации CO2 в дымовых газах примерно до 25% от максимально достигнутой в момент наиболее интенсивного горения (европейский критерий определения момента окончания топки). Дверца топки была полностью закрыты на протяжении всего времени топки. Вместо поддувальной дверцы был установлен патрубок, который обеспечивал постоянное проходное сечение 123х118мм и фиксировал корпус анемометра в одинаковом положении независимо от схемы проведения опыта. Допускалось 1-2 шевеления дров на закладку.

Для перекрывания сухого шва была использована конструкция из листового металла, которая пружинно входила в сухой шов на 100мм. Заслонка не обеспечивала абсолютной герметизации СШ, но перекрывала его с достаточной плотностью. Внешний вид заслонки сухого шва показан на рис.8. Расположение заслонки сухого шва в топке показано на рис.9.

Рис.8. Заслонка сухого шва (внешний вид после испытаний)

Рис.9. Заслонка сухого шва установлена в топке котла

3 . Результаты испытаний

Испытания котла проводились по двум направлениям:
- определение эффективности работы колпака "по воде" при топке по трем схемам организации топочного пространства;
- определение эффективности работы котла в целом при топке по трем схемам организации топочного пространства.

3.1. Определение эффективности работы водяного регистра

Текущая мощность теплосъема с водяного регистра определялась по формуле:

$$W_{вод} = c_{вод} * v_{вод} * (t_{вод.вых} - t_{вод.вх}) / 60 \text{ Вт,} \quad (1)$$

где $c_{вод}$ - удельная теплоемкость теплоносителя (в качестве теплоносителя использована смесь этиленгликоля с водой в соотношении 1:1) . С учетом удельного веса смеси, принимаем $c_{вод}$ = 3380 Дж/(л*К);

$v_{вод}$ - текущий расход теплоносителя, л/мин;

$(t_{вод.вых} - t_{вод.вх})$ – прирост температуры на регистре котла, К.

На рис. 10 приведен внешний вид типичной зависимости текущей мощности тепловосприятия регистра от времени.

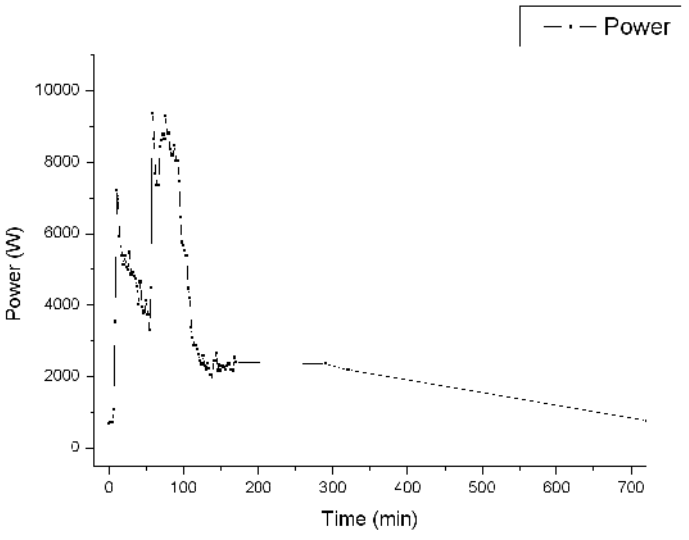

Рис.10. График зависимости текущей мощности от времени

Для определения суммарной тепловой энергии, воспринятой регистром, брался промежуток времени в 12 часов, т.к. на практике оказалось, что в существующих условиях эксплуатации этого времени вполне достаточно для того, чтобы котел отдал регистру практически всю тепловую энергию, накопленную за время стандартизованной топки.

Полученные графики мощности теплосъема интегрировались по времени в программе OriginPro 8 SR2 с целью определения суммарной тепловой энергии, переданной теплоносителю за 12 часов. Результаты испытаний "по воде" сведены в таблицу 1.

Всего по котлу было проведено 10 опытов. Первые три оказались неудачными в связи с тем, что использовались сырые дрова (влажность около 50%), т.к. других не было. После завоза сухих дров (средняя влажность 17%) еще три опыта ушло на то, чтобы настроить ультразвуковой расходомер и добиться стабильности его показаний. Таким образом, для окончательного анализа взяты данные четырех последних опытов. Даты проведения конкретных опытов указаны в таблице 1.

Табл.1

Дата опыта	Схема организации топочного пространства	Тепловая энергия, отданная теплоносителю за 12 часов, кВт*час
09.03.2011 10.03.2011	КИК-18 "как есть" (в авторском исполнении)	22,94 21,43
08.03.2011	Котел с закрытым сухим швом	26,34
07.03.2011	Котел с закрытым сухим швом и с закрытым дальним хайлом	23,54

К сожалению, за время испытаний не было возможности сделать достаточное количество опытов по каждой схеме организации топочного пространства. Вполне возможно, что на изменение теплоотдачи повлияли какие-либо неучтенные случайные переменные (например, 08.03.2011 одновременно с испытаниями котла топилась и печь, установленная на первом этаже здания и имеющая общую с котлом дымовую трубу). Поэтому более целесообразно говорить не о достоверном преимуществе той или иной схемы, а о том, что в процессе испытании котла КИК-18 в Полушкино достоверных преимуществ той или иной схемы устройства топочного пространства не выявлено.

Фактический КПД котла "по воде" составил не более 24% (тепловая энергия, выделяющаяся при сжигании 26кг дров составляет 112,7кВт*час. см. раздел 3.3.2). Это при том, что котел фактически топился два раза в сутки (за исключением 06.03.2011г, когда вечерней протопки не было). Во время вечерней протопки котла измерений не производилось.

Предположительно снижают эффективность котла в Полушкино в основном следующие факторы:

1. Стенки топки сделаны из теплоемкого материала, поэтому значительная часть тепловой энергии поглощается стенками и не доходит до водяного регистра. (см. рис.13).
2. Водяной регистр установлен за боковой стенкой, что исключает нагрев лучистой энергией.
3. Чистка регистра в процессе эксплуатации не производилась, поэтому трубы водяного регистра имели значительный сажевый налет, образовавшийся за два сезона топки дровами с неконтролируемой влажностью. (см. рис.12).

Рис.12. Вид на регистр из нижней прочистки

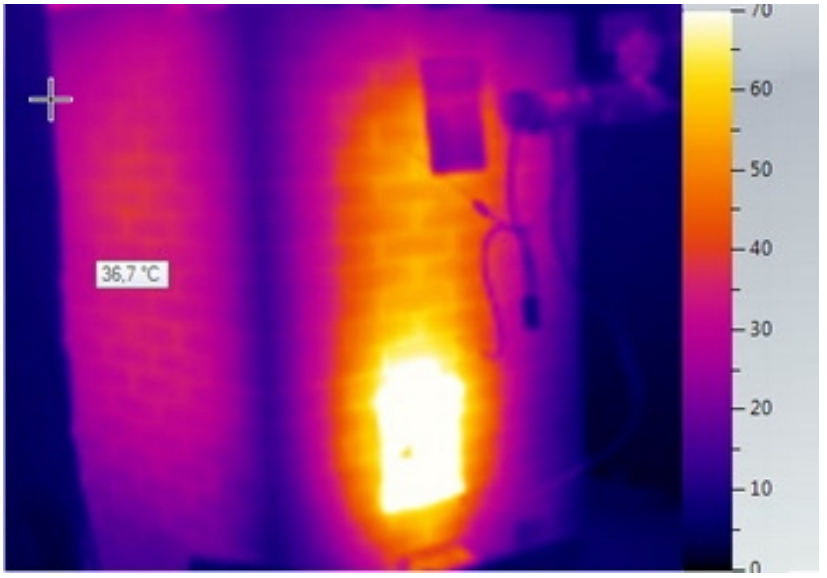

Рис. 13. Снимок котла тепловизором. Видно, что после четырех часов от начала топки боковая поверхность котла прогрелась до температуры 37^{o}C, а передняя – до 53 ^{o}C

3.2. Сравнение результатов анализа отходящих газов

Параметры отходящих газов фиксировались газоанализатором, установленным перед заслонкой дымовой трубы (см. рис.6). Запись осуществлялась в режиме реального времени. Результаты испытаний представлены в виде графиков (типичный график показан на рис.12) и таблиц средних значений (см. пример на рис. 13).

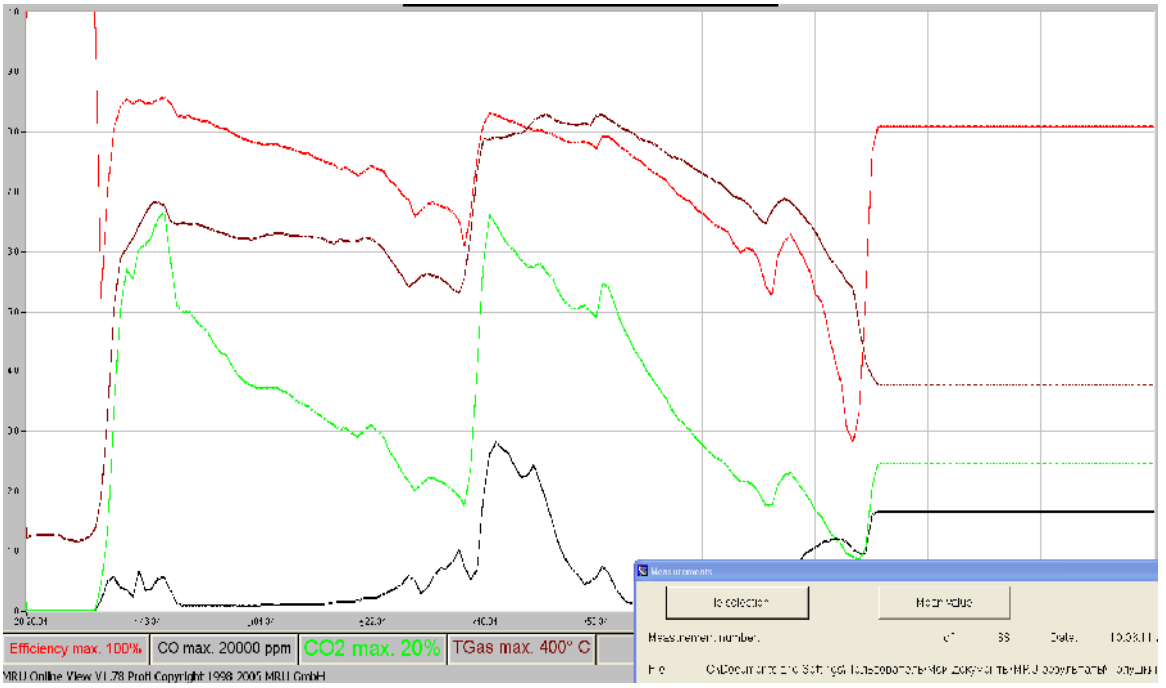

Рис.12. Графики изменения параметров отходящего газа в процессе топки по схеме котел КИК-18 «как есть». 10 марта 2011г.

- красным цветом показана эффективность процесса (максимальное значение поля графика по координате У = 100%),
- коричневым – температура отходящих газов (Умакс = 400 ^{o}C),
- зеленым – концентрация CO2 (Умакс = 20%) ,
- черным – концентрация CO (Умакс = 50 000ppm).

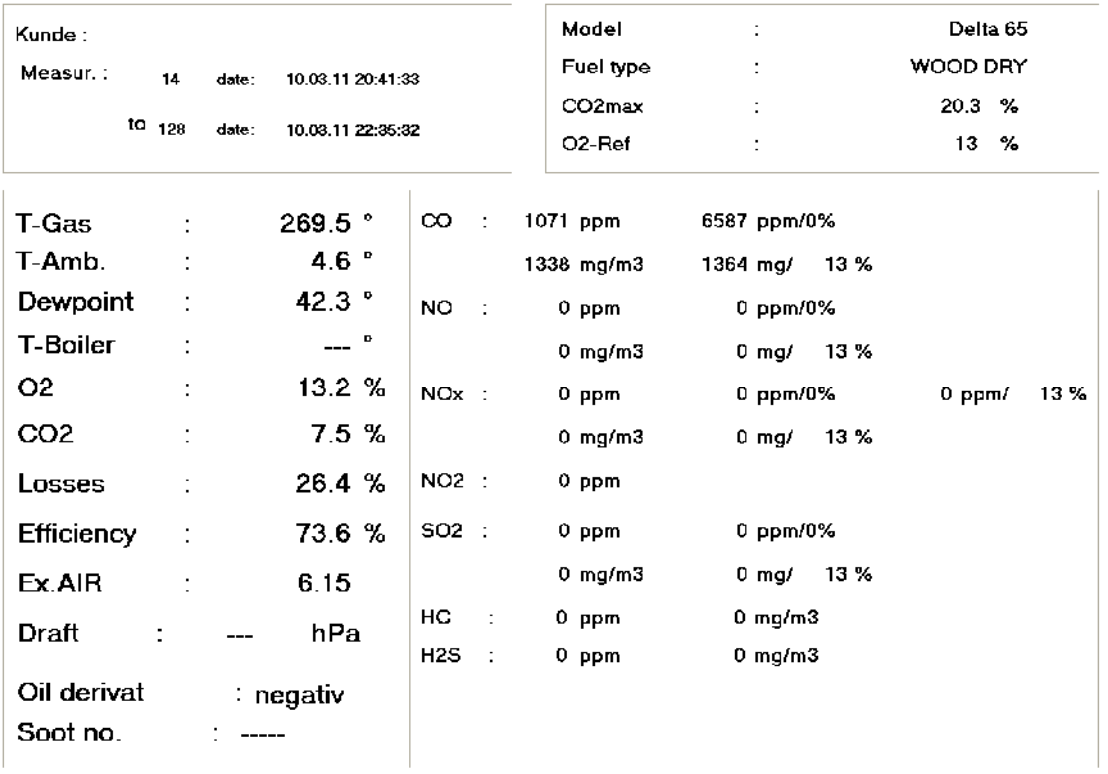

Рис.13. Средние показатели процесса от 10 марта 2011г.

Средние значения результатов газового анализа сведены в таблицу 2.

Табл.2

Дата опыта	Схема организации топочного пространства	КПД, %	Концентр. CO2, %	Темпе-ратура газа на выходе, °C
04.03.2011 10.03.2011	КИК-18 "как есть" (в авторском исполнении)	71,4 73,6	7,0 7,5	274,3 269,5
08.03.2011 05.03.2011	Котел с закрытым сухим швом	68,4 72,5	6,6 7,1	291,7 266,9
07.03.2011 06.03.2011	Котел с закрытым сухим швом и с закрытым дальним хайлом	77,0 74,3	7,7 7,5	239,7 256,7

За момент начала топки взято первое значение КПД отличное от нуля. Учитывая, что скорость входа процесса горения в режим достаточно высока (график КПД в начале горения представляет собой почти вертикальную линию), определение момента начала топки определяется достаточно однозначно, т.к., например, увеличение КПД от 0 до 50% укладывается в промежуток времени в 1 минуту (интервал времени между двумя последовательными замерами).

За момент окончания топки принято условие снижения концентрации CO2 в дымовых газах до 25% от максимально достигнутой в опыте концентрации. Например, если при наиболее интенсивном горении концентрация CO2 достигла 12%, то за окончание топки принимается момент снижения концентрации CO2 до 3%. Данный критерий определения момента окончания топки регламентирован европейским стандартом EN 15250.

Как видно из таблицы все три варианта приблизительно равнозначны. Некоторое "выбивание" показателей в опыте от 07.03.2011г вполне возможно и от того, что в предыдущий день вечерняя протопка котла не производилась.

3.3. Определение потерь тепловой энергии с отходящими газами

3.3.1. Влажность дров

Влажность дров определяли следующим образом. Образец древесины известной массы раскалывали на небольшие щепки, которые высушивали в хлебной камере отопительной печи до постоянного веса при температуре 60 – 150 °C в течение 3-4 дней. Всего было сделано два образца. Результаты в таблице 3.

Табл.3

	Масса образца, г	Масса сух., г	w, %	W, %
1	812	683	18,9	15,9
2	540	462	16,9	14,4
Средн.			17,9	15,2

Влажность w – отношение массы воды в образце к массе сухой древесины,
W – отношение массы воды к массе всего образца.

3.3.2. Теплота сгорания дров

Теплоту сгорания дров вычисляли по формуле, влажность в долях:

$q = 1/(1+w) * (4500 – 583 * w)$ [ккал/кг]

Теплота сгорания составила q = 3728 ккал/кг.
Теплосодержание закладки дров определяли по формуле:

$Q = M * q /860$ [кВт*час]

При закладке в 26 кг Q = 112,7 кВт*час.

3.3.3. Объем прошедшего через печь воздуха, средний коэффициент избытка воздуха

В ходе экспериментов определяли скорость потока воздуха на входе в печь. Это позволило вычислить абсолютные объемы воздуха, прошедшего через печь и средний избыток воздуха при работе печи.

Однако оказалось, что вычисление объема воздуха с помощью примененного анемометра может иметь значительную погрешность (до 30 %). С чем это связано сказать сложно, возможно с неточностью прибора или с другими случайными переменными (например, климатические условия), влияние которых не учтено.

Вычислить погрешность удалось следующим образом. Зная влажность дров, их массу и удельный стехиометрический объем (табличная величина) можно вычислить стехиометрический объем воздуха для их горения.

$V = 1/(1+w) * M * V^0$

С другой стороны можно вычислить объем сгоревшего воздуха как определенный интеграл от скорости горения воздуха за весь период опыта. $V = \int_{н}^{к} \frac{F(t)}{\alpha(t)} dt$ Скорость горения воздуха равняется частному от деления потока на коэффициент избытка воздуха. Эти две величины должны быть равны. Результаты приведены в таблице 4.

Табл.4

	Схема	Прим.	Время гор., мин	V стех., $нм^3$	V сгор, $нм^3$	Погрешн., %	V общ., $нм^3$	Альфа средн.
10.03	Как есть		122	101,1	116,2	+15	332,8	2,87
08.03	СШ закр.	В. печь работает	120	101,1	98,7	- 2	338,1	3,43
07.03	СШ, ХЛ закр.		124	101,1	105,0	+4	301,3	2,87
06.03	СШ, ХЛ закр.		138	101,0	116,1	+15	345,3	2,97
05.03	СШ закр.	Ветер	150	100,9	131,0	+30	425,7	3,25
04.03	Как есть		136	101,0	125,8	+25	394,0	3,13

Общий объем вычисляли интегрированием потока входящего воздуха за весь период топки. Средний коэффициент избытка воздуха Альфа вычисляли как отношение

Vобщ./Vсгор. Погрешность, о которой говорилось выше, не окажет влияния на вычисленный Альфа, т. к. одинаковым образом входит в числитель и знаменатель дроби.

3.3.4. Потери с уходящими газами

Планировалось определить потери с уходящими газами по методике А. Бацулина «Опр. потерь с помощью анемометра и термопары», однако в связи с погрешностью абсолютного определения потока воздуха потери определяли способом усреднения показаний ГА с нормировкой (см. статью А.Бацулина http://kirpichiki.pro/read/articles/averaging-of-ga-data.html). Потери и нормировочные коэффициенты рассчитывали для интервала времени с концентрацией CO_2 > 25% CO_2max. Результаты в таблице5.

Табл.5

	Схема	Прим.	Время гор.,мин	Альфа средн.	Потери, %	Потери по ГА, %
10.03	Как есть		122	2,87	23,9	26,4
08.03	СШ закр.	Верхняя печь работает	120	3,43	29,1	31,6
07.03	СШ, ХЛ закр.		124	2,87	21,4	23,0
06.03	СШ, ХЛ закр.		138	2,97	22,8	25,7
05.03	СШ закр.	Ветер	150	3,25	25,7	27,5
04.03	Как есть		136	3,13	25,7	28,6

В целом, значимых различий по величине потерь с дымовыми газами при изменении конструкции котла не обнаружено.

При сравнении потерь по методу, учитывающему полный объем газового потока, проходящего через печь, со средними значениями потерь, определяемыми газоанализатором, видно, что они хорошо согласуются друг с другом, причем значения потерь по газоанализатору стабильно выше всего на несколько единиц. Фактически, превышение составляет от 1,6 до 2,9 единиц. Таким образом, видно, что результаты испытаний, определенные с помощью газоанализатора, вполне возможно использовать для оценки эффективности печи в целом.

Опыт от 08.03 сильно выбивается из общих показателей, здесь самый большой коэффициент избытка воздуха альфа = 3,43. При проведении этого опыта работала печь, расположенная в доме над котлом. скорее всего, это дало повышенную тягу в общем дымоходе, и, соответственно, повышенный расход воздуха и завышенные потери, возможно, присутствовал и другой, неучтенный фактор.

Опыт от 05.03 был проведен в ветреную погоду, что также могло повлиять на величину потерь.

3.3.5. CO в отходящих газах

Содержание CO в отходящих газах определяли усреднением величины CO, полученной с газоанализатора, приведенной к неразбавленным ДГ. Усреднение проводили с учетом нормировочного коэффициента, пропорционального потоку отходящих газов. Усреднение без коэффициента даст несколько заниженные значения, т. к. в конце процесса горения концентрация CO резко возрастает, и поток ДГ возрастает.

$$N(t) = \frac{F_{отх}(t)}{\overline{F_{отх}}}$$

$$F_{отх}(t) = F(t)\left[1 + \frac{1}{\alpha(t)} \cdot \frac{\Delta V}{V^0}\right] \qquad \text{где}$$

$$\Delta V = V^{o}_{отх} - V^0 + 1,24 \cdot w$$

V^0 и $V^0_{отх}$ – удельные стехиометрические объемы воздуха и дымовых газов, нм3/кг.
w – влажность, доли.

Нормированная концентрация CO в неразбавленных ДГ:

$$CO^{norm}_{undill}(t) = CO(t) \cdot N(t) \cdot \alpha(t)$$

Усредненные величины приведены в таблице6.

Табл.6

	Схема	Прим.	Время гор.	Альфа средн.	CO средн, ppm
10.03	Как есть		122	2,87	4253
08.03	СШ закр.	В. печь работает	120	3,43	4593
07.03	СШ, ХЛ закр.		124	2,87	4393
06.03	СШ, ХЛ закр.		138	2,97	5001
05.03	СШ закр.	Ветер	150	3,25	4995
04.03	Как есть		136	3,13	5086

Значимых различий по концентрации CO в дымовых газах не обнаружено.

4. Выводы и рекомендации

1. При изменениях схемы движения газов в испытуемом котле значимых изменений отдачи регистра «по воде» не зафиксировано.

№ п/п	Схема организации топочного пространства	Дата опыта	Темпе-ратура газа на выходе, ^{o}C	Тепловая энергия, отданная теплоносителю за 12 часов, кВт*час
1	КИК-18 "как есть" (в авторском исполнении)	09.03.2011 10.03.2011	- 269,5	22,94 21,43
2	Котел с закрытым сухим швом и с закрытым дальним хайлом	07.03.2011 06.03.2011	239,7 256,7	23,54 -

2. Значимых различий по концентрации CO в дымовых газах не обнаружено

3. В связи с выявленной засаживаемостью водяного регистра целесообразно указать потребителю периодичность чистки тепловоспринимающей поверхности регистра. Рекомендовать потребителю применять для топки топливо влажностью не более 20-25%.

4. При сравнении результатов испытаний с использованием сухого шва и без него, на испытуемом котле значимых различий не обнаружено.