

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ КОТЛА, ОСНОВАННОГО НА ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ГОРЕНИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА**

Синицын А.А.

*Вологодский государственный технический университет*

Актуальность проблемы повышения эффективности работы источников теплоты является бесспорным аргументом при разработке новых теплогенерирующих устройств и модернизации существующих. Техническое повышение мощности горелочного устройства, применение топлив с повышенным тепловыделением при сгорании, увеличение поверхности теплопередачи – методы, не всегда выполнимые и зачастую высокочрезвычайно затратные. Поэтому необходимо развитие теплотехники по новым и более эффективным путям технического развития и экологической безопасности [1]. В этом направлении весьма перспективным представляется реализация в теплоэнергетических установках процессов пульсирующего горения. Такой режим горения позволяет обеспечить максимальную полноту тепловыделения топлива, существенно интенсифицировать тепломассообменные процессы и повысить теплонапряженность камеры сгорания. При таких условиях очевидно уменьшение металлоемкости конструкции, сокращение затрат на монтаж и обслуживание теплоэнергетических установок. Кроме того, продукты сгорания отвечают самым жестким экологическим требованиям.

В работе проводится исследование характеристик котлоагрегата типа резонатора Гельмгольца на различных режимах его работы, а также сравнительный анализ с устройствами без искусственно созданного вибрационного режима. Даются рекомендации по повышению эффективности работы аналогичных аппаратов.

### ***Общие сведения о процессе пульсирующего горения.***

*Пульсирующим горением* называют неустойчивый режим горения с изменяющимися во времени динамическими характеристиками процесса, имеющими периодическую составляющую.

Существует большое количество устройств пульсирующего горения, или аппаратов пульсирующего горения с различным видом организации автоколебательной системы – от квазигармонических до релаксационных, и различного назначения – от котлов до печей-утилизаторов и сушильных установок – см.[2-3].

Объектом исследования является котел пульсирующего горения (КПГ) типа резонатора Гельмгольца. Характерной особенностью подобного аппарата является способность совершать низкочастотные собственные колебания, длина которых значительно больше размеров резонатора.

Процесс пульсирующего горения происходит следующим образом. При первичном поступлении топливной смеси в камеру сгорания осуществляется ее поджог. После полного сгорания смеси возникает ударная волна и снижение давления за ударной волной с одновременным охлаждением дымовых газов за счет теплопередачи в стенку камеры. При этом происходит поступление новой порции газовой смеси за счет разрежения. Эта смесь нагревается до температуры самовозгорания (около 600 °С) остаточным теплом дымовых газов. В процессе сгорания смеси дымовые газы из камеры сгорания под действием проталкивающей силы ударной волны направляются к открытому выходу через резонаторную горловину. Процесс повторяется без поджигания смеси посторонним источником. Система входит в автоколебательный режим. Устанавливается периодический процесс, именуемый пульсирующим горением.

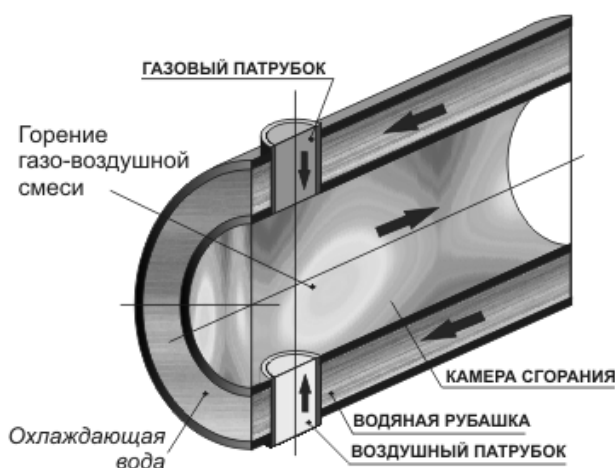


Рисунок 1. Схема камеры сгорания котла пульсирующего горения в разрезе

Частота этого процесса определяется конструкцией резонаторной системы, имеющей собственную резонансную частоту.

Камера сгорания и резонансные трубы окружены водяной рубашкой, по которой движется (противоток к дымовым газам) нагреваемая вода – рис. 1.

Более подробно процесс изложен в работах [4-6].

Проведенный анализ существующих устройств аналогичного принципа действия показал современный уровень развития техники и технологий подобного метода сжигания топлива. Отраженный в новых технических разработках российских и зарубежных производителей, данный метод позволяет дальнейший выход на прикладные реализации пульсирующего горения в промышленной теплоэнергетике в различных ее сферах.

В рассматриваемом аппарате на режим турбулентного движения накладывается пульсационная составляющая, которая повышает эффективность теплопередачи, снижает площадь теплообмена и, тем самым, определяет малые габаритные размеры агрегата с повышенной теплонапряженностью при тех же мощностях, что и у факельных теплогенераторов.

Наряду с достоинствами, связанными с повышением теплонапряженности, возникают и недостатки, заключающиеся в прогорании этих самых поверхностей, а также значительный шум, обусловленный процессом горения. Все это приводит к тому, что подобные устройства отодвигаются на второй план, и делается выбор не в их пользу. Поэтому основной задачей при проектировании, а также при проверочном расчете подобных агрегатов является определение термогидродинамических параметров, влияющих на теплопередачу в котлоагрегате.

### ***Разработка алгоритма реализации термогидродинамической модели***

Источник теплоты вибрационного горения условно представляет собой теплообменное устройство, состоящее из газо-водяного жаротрубного теплообменника типа «труба в трубе», в котором энергия сгораемого топлива идет на изменение внутренней энергии продуктов сгорания, совершения работы всасывания и проталкивания, на диссипацию энергии в охлаждающую воду системы теплоснабжения и выброс дымовых газов в окружающую среду.

Для исследования особенностей работы котла проведено математическое моделирование протекающих в нем тепломассообменных процессов и

комплексное экспериментальное апробирование на действующей промышленной установке.

Процесс пульсирующего горения есть неравновесный процесс, поэтому ставилась нестационарная задача, направленная на изучение закономерностей влияния пульсирующих параметров течения на термогидродинамические характеристики рабочего процесса. Решение заключалось в построении модели через описание явления движения и теплопередачи в виде систем дифференциальных уравнений с начальными и граничными условиями применительно к данной конструкции котла пульсационного горения.

Проведено решение квазистационарной задачи через реализацию математической модели численными методами. С этой целью разработана численная схема конечноразностного решения системы.

В результате моделирования построены термогидродинамические функции распределения параметров теплоносителей по длине исследуемого тракта котла [6].

- Термодинамическая функция (ТМ):

$$TM=f_T ( L, S, T1, T2, T3, P_n, P_k), \quad (1)$$

- Гидродинамическая функция (Pmax и Pmin)

$$P=f_P ( L, S, T1, T2, T3, P_{max}, P_{min}), \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние, на котором определяется значение давления;

$S$  – шаг выборки по длине, показывающий точность расчета;

$T1$  – начальная температура дымовых газов;

$T2$  – граничная температура охлаждающей воды;

$T3$  – начальная температура стенки с внутренней стороны к газу;

$P_n$  - начальное давление в камере сгорания;

$P_k$  - конечное давление в камере сгорания.

Новые программные функции, исполненные в технологии MathCAD, позволяют определить значение давления на заданном участке длины тракта котлоагрегата пульсирующего горения с заданной точностью расчета при исходных значениях температуры газовой среды, температуры стенки и конечной температуры охлаждаемого теплоносителя.

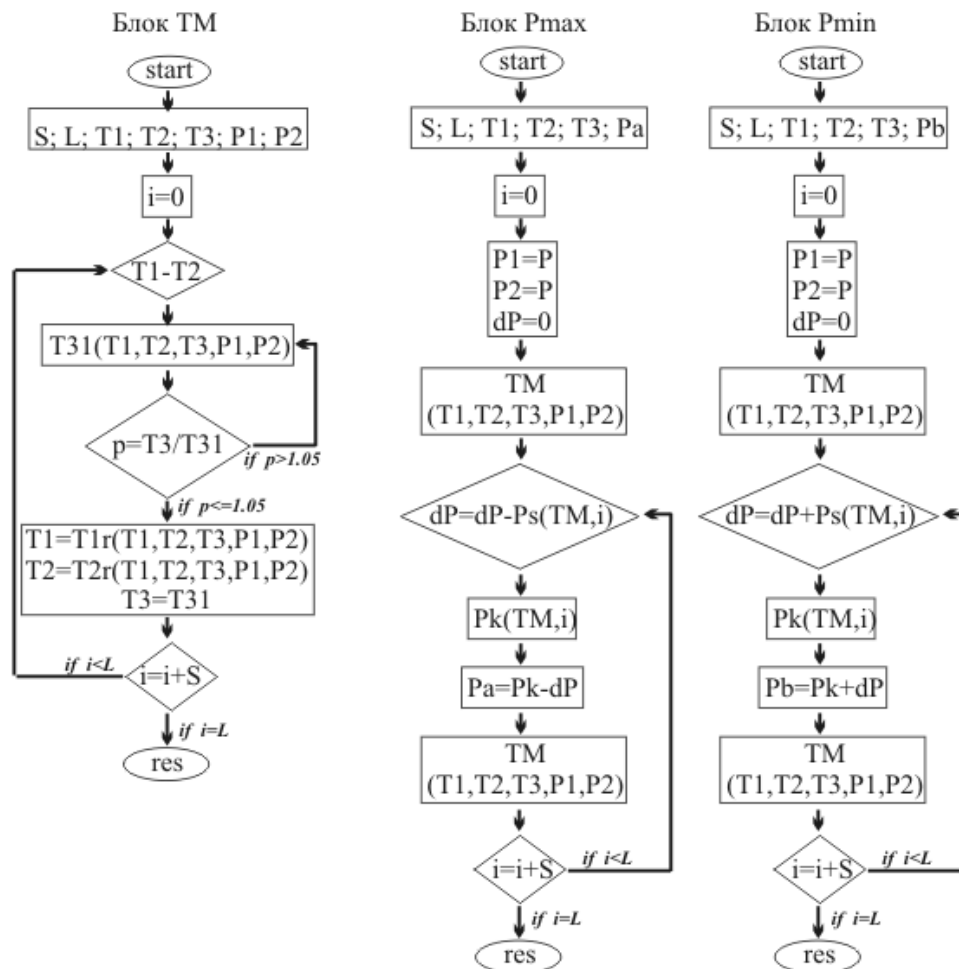
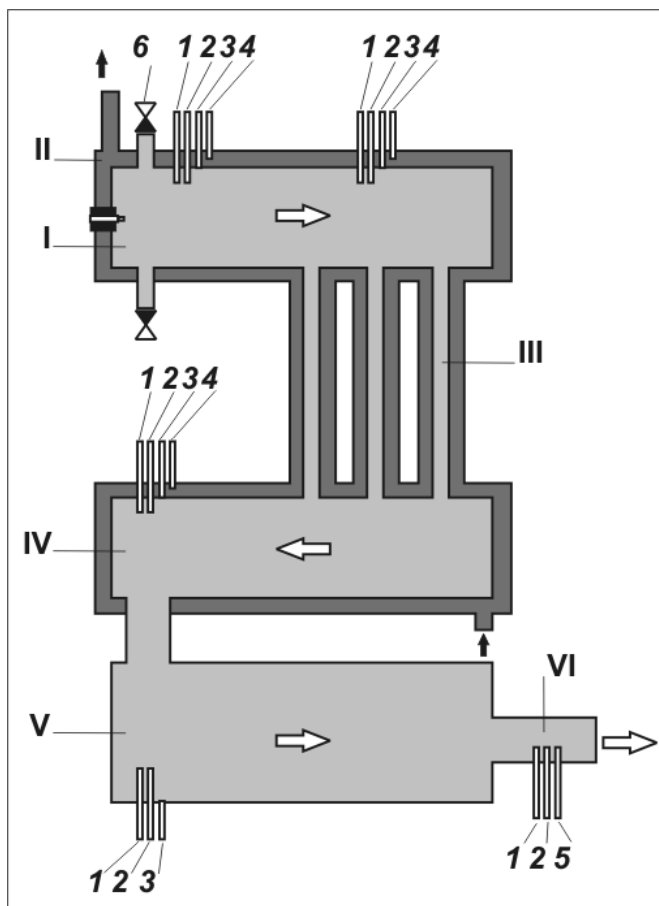


Рисунок 2. Блок-схемы итерационного пошагового пересчета динамических параметров ТГМ

Для подтверждения достоверности и точности расчета параметров работы КПП было проведено комплексное экспериментальное апробирование ТГМ:

1. Определение режима работы КПП;
2. Оценка влияния вибрационного режима работы КПП.

Опыты проводились на различных рабочих режимах установки по 3 замера на каждой опытной точке. С этой целью определялись изменения амплитуд колебаний давления среды в камере и распределения температур газового и водяного теплоносителя по длине тракта котла (см. рис.3).



**Точки измерения:**

- 1 – давление в дымовых газах;
- 2 – температура дымовых газов;
- 3 – температура разделяющей металлической стенки;
- 4 – температура охлаждающей воды в водяном тракте;
- 5 – газовый анализ состава продуктов сгорания на выходе из КПГ;
- 6 – давление в топливе.

*Рисунок 3. Схема котла пульсирующего горения*

*I – камера сгорания; II – водяная рубашка; III – резонансные трубы; IV – резонаторный ресивер; V – глушитель выхлопа; VI – дымовая труба.*

**Таблица 1**

Режимная характеристика испытаний КПГ

№ режима	Давление газа избыточное, Па	Расход топлива, м <sup>3</sup> /ч	Теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД сгорания, %
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
1	2350	33,8	24,8	91,4
2	1500	30,3	22,2	91,3
3	700	26,9	19,5	90,5
4	100	25,1	18,2	90,4

## Определение режима работы КПП

Проведен анализ результатов моделирования термогидродинамических характеристик КПП.

### 1. Гидравлическая характеристика

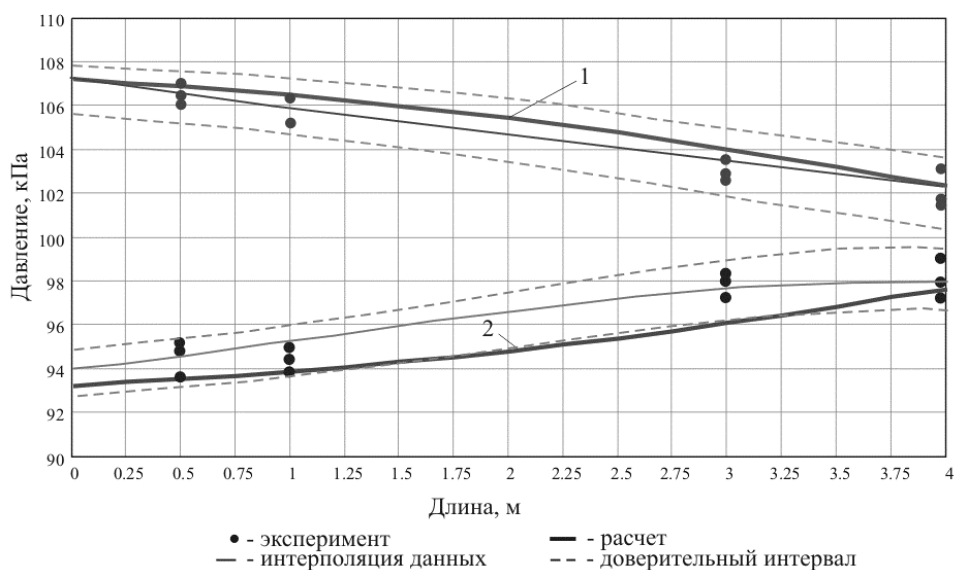


Рисунок 4. Распределение давления в КПП по длине канала:  
1 – максимальное давление; 2 – минимальное давление

Основные влияющие условия на изменение давления в газовом канале – это падение давления в результате термоакустических колебаний (см. рис.4); потери давления на трение и местные сопротивления имеют несущественное воздействие. Результаты расчета соответствуют опытным данным.

### 2. Термическая характеристика

Распределение температур в КПП по длине канала определяется равномерным понижением по аналогии с газо-водяным теплообменным рекуперативным аппаратом с противоточной схемой движения теплоносителей. Точность расчета подтверждена экспериментальными замерами.

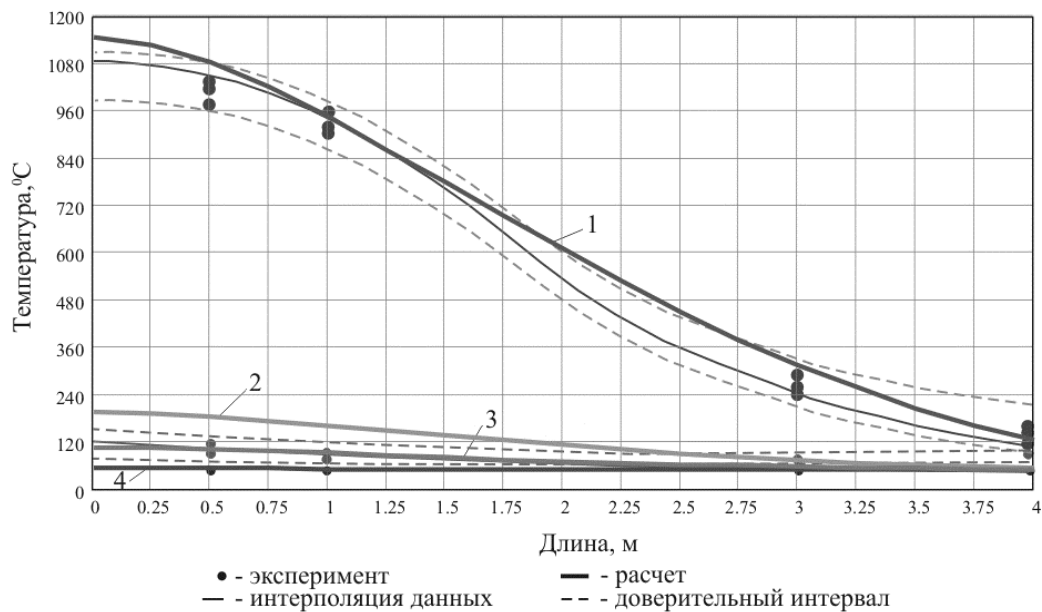


Рисунок 5. Распределение температур в КПП по длине канала:  
1 – дымовые газы; 2 – стенка со стороны газа;  
3 – стенка со стороны воды; 4 – водяной теплоноситель

### 3. Энергетическая характеристика

Для четырех рабочих режимов (см.табл.) построена обобщенная энергетическая характеристика, отображающая зависимость теплонапряженности сечения канала  $q_s$ , кВт/м<sup>2</sup> по его длине.

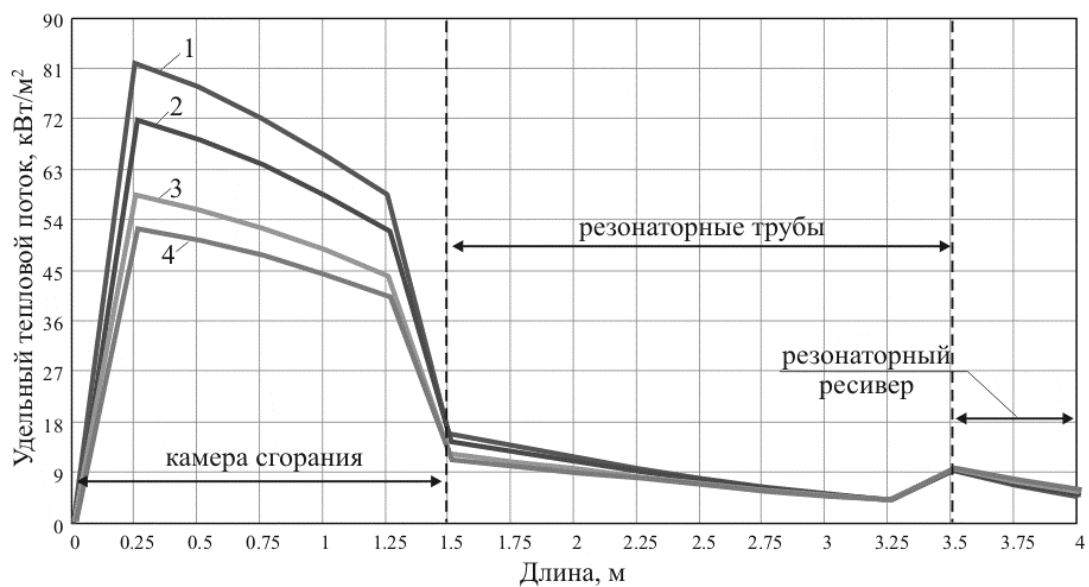


Рисунок 6. Теплонапряженность канала КПП  $q_s$  по длине  
где 1 – режим №1; 2 – режим №2; 3 – режим №3; 4 – режим №4.

Согласно распределению теплового потока в КПП по длине газового канала, более 75 % тепловой энергии, воспринятой водой, передается в камере сгорания, около 20 % - в резонаторных трубах и около 5% - в резонаторном ресивере. Характер распределение теплового потока в КПП также определяется конструктивными характеристиками резонаторных труб (количество, размеры, соотношение сечений газа и воды). Их соотношение с характеристиками камеры сгорания изменяет ее теплонапряженность в общей доле нагрузки котлоагрегата.

### Оценка влияния вибрационного режима работы КПП

Для оценки эффективности пульсационно-турбулентного режима течения газа по сравнению турбулентным, проведено сравнительное моделирование термогидродинамических характеристик в тракте КПП и жаротрубного котла с подобными геометрическими и расходными характеристиками. Необходимым условием подобия было равное начальное давление дымовых газов и температуры в зоне горения ( $l_x=0$ ). В результате моделирования получены следующие характеристики:

#### 1. Термическая характеристика

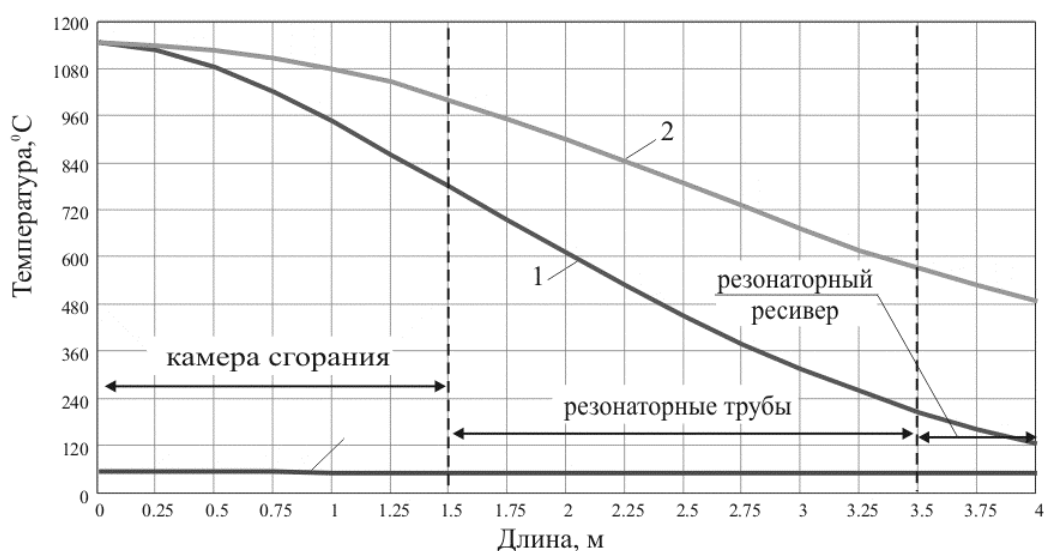


Рисунок 7. Распределение температур в КПП по длине канала, где температура дымовых газов в режиме: 1 – пульсационно-турбулентного; 2 – турбулентного; 3 – водяной теплоноситель.

На основании расчета падение температуры газового теплоносителя на выходе из канала при пульсационно-турбулентном течении больше, чем при чисто турбулентном на 25%, что объясняется более высокими скоростями движения газа относительно стенки за счет пульсационной составляющей и, как следствие, повышенной теплоотдачей (см. рис. 7).

## 2. Энергетическая характеристика

Сравнение энергетических характеристик (рис. 8) при турбулентном и пульсационно-турбулентном течениях показало увеличение теплонапряженности топочного устройства при пульсационно-турбулентном течении в 3 раза при равных начальных условиях.

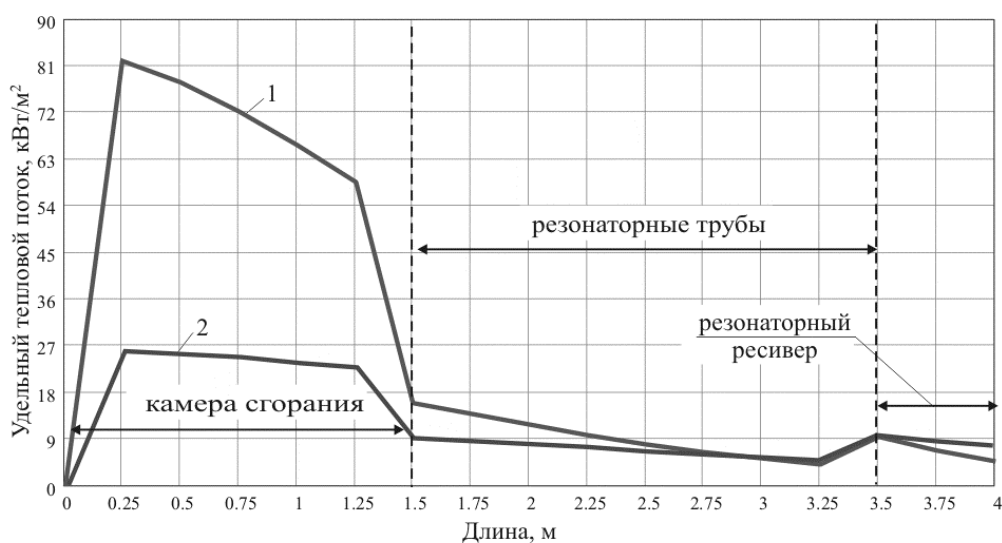


Рисунок 8. Теплонапряженность канала  $q_s$  по длине в режиме:  
1 – пульсационно-турбулентного; 2 – турбулентного

### ***Основные результаты и выводы***

В результате исследования вибрационных характеристик работы котла, основанного на устройстве резонатора Гельмгольца, получены следующие результаты:

1. Основные влияющие условия на изменение давления в газовом канале – это падение давления в результате термоакустических колебаний; потери давления на трение и местные сопротивления имеют несущественное воздействие.
2. На основании расчета падение температуры газового теплоносителя при пульсационно-турбулентном течении больше, чем при турбулентном, что объясняется более высокими скоростями движения газа за счет пульсационной составляющей, и, как следствие, повышенной теплоотдачей.
3. Согласно распределению теплового потока в КППГ по длине газового канала, более 75 % тепловой энергии, воспринятой водой, передается в камере сгорания, около 20 % - в резонаторных трубах и около 5% - в резонаторном ресивере. Характер распределения теплового потока в КППГ также определяется конструктивными характеристиками резонаторных труб (количество, размеры, соотношение сечений газа и воды). Их соотношение с характеристиками камеры сгорания изменяет ее теплонапряженность в общей доле нагрузки котлоагрегата
4. На основе данных потребления топлива от рабочего давления газа (см. рис.9), где явно просматривается незначительное уменьшение поступления газа по сравнению с изменением давления, уйти от системы старт-стопного режима работы к режиму регулирования подачи газа от заданной температуры на выходе воды из котла. Тем самым, снизить нагрузку на клапанную систему котла, которая изнашивается в основном при перезапуске, и, одновременно, обезопасить котел от перегрева и интенсивного парообразования в водяной рубашке.

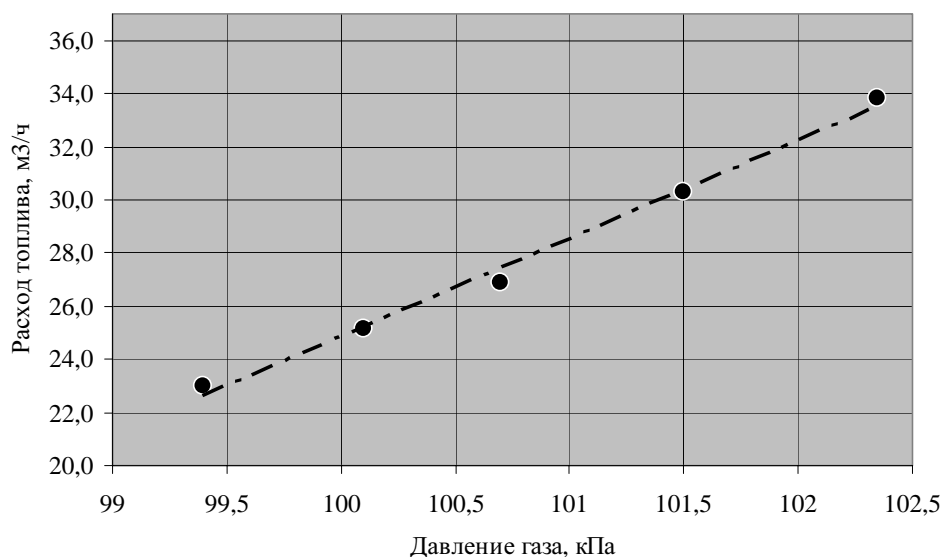


Рисунок 9. Зависимость потребления топлива от давления на входе в КПП (давление газа указано в абсолютных величинах, при атмосферном давлении 100 кПа)

- Согласно проведенным опытам, зависимость расхода газового топлива ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) от установленного давления (Па) на входе в КПП можно определить как линейную:

$$B(P_2) = 3,8 \cdot P_2 - 355,4, \quad (3)$$

- Отличительной особенностью КПП можно отметить работу котлоагрегата в области давления газа ниже атмосферного ( $P_{\text{ги}} = \text{до } -600 \text{ Па}$ ), когда в момент разрежения в камере сгорания он работает как «топливный насос», выкачивая необходимое для горения количество газа. Это наиболее рационально в случае понижения давления в газовой сети ниже рабочего значения, когда обычные горелочные устройства останавливаются.
- Сравнение энергетических характеристик при пульсационно-турбулентном и турбулентном течениях показало увеличение теплонапряженности топочного устройства в первом случае в 3 раза.
- Повышенная теплонапряженность топочной камеры при пульсационно-турбулентном течении греющей среды в условиях теплообмена по сравнению с жаротрубными установками повышает эффективность работы устройства, основанного на вибрационном горении топлива, что создает преимущество в энергоэффективности и металлоемкости по сравнению с котлами факельного горения.

## Литература

1. Поляков, М.И. Устройство Пульсирующего Горения (ПГ) – выбор в пользу принципиально иной технологии выработки тепла, путь к радикальному снижению его себестоимости / М.И.Поляков // Энергетика в нефтегазодобыче, - 2002. - №1. - с.15–27
2. Кацнельсон, Б.Д. Экспериментальное исследование пульсирующего горения /Б.Д.Кацнельсон, И.Я.Мароне, А.А.Таракановский // Теплоэнергетика. – 1969. - № 1. с.3-6.
3. Ларионов, В.М. Автоколебания газа в установках с горением / В.М.Ларионов, Р.Г. Зарипов. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. - 227 с.: ил.
4. Сеницын, А.А. Расчетно-экспериментальное моделирование гидродинамического состояния теплообменного устройства с резонатором Гельмгольца / А.А.Сеницын // Вузовская наука – региону: Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции.- Вологда: ВоГТУ, - 2005. – с.84-86.
5. Сеницын, А.А. К построению математической модели гидротермических процессов в источнике теплоты пульсирующего горения / А.А.Сеницын, В.И.Игонин // «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства»: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию ОАО «Северсталь». – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, - 2006. - с.139-141.
6. Сеницын, А.А. Особенности автоматизации вычислений при проектировании источников теплоты пульсирующего горения / А.А.Сеницын, В.И.Игонин // Автоматизированная подготовка машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы Международной научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, - 2005. Т.2. – с.193-195.