

Исследования по созданию эффективной горелки для тепловых установок пищевой промышленности

М.А.Амосова, В.Т.Антуфьев, aleex_g@mail.ru

Санкт-Петербургский Государственный Университет
Низкотемпературных и Пищевых Технологий

С целью повышения эффективности горения газа и снижения размеров тепловых блоков оборудования предложено сжигать газ в виде ионизированной смеси, воздействуя на нее электрическим полем. При этом мгновенно во всем объеме в любой точке топки начинают действовать кулоновские силы отталкивания, разрушающие кластерную структуру горючей смеси. За счет интенсивного перемешивания происходит процесс одновременного горения факела, значительного повышения температуры и усиливается его светимость. Нагрев рабочей поверхности уже происходит в большей степени за счет излучения в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом спектре, чем конвективным путем от горячих газов. Количество угарного газа снижается.

Ключевые слова: электрическое поле, ионизированная горючая смесь, кулоновские силы, светимость факела, нагрев излучением.

Все известные выпускаемые горелки, в том числе и многотопливные, из-за недостаточного качества смесеобразования требуют подачи избыточного количества воздуха, тем самым, расходуя часть энергии горения на его нагрев и значительно снижая температуру факела и дымовых газов. К недостаткам следует отнести также и тот факт, что они из-за неполного сгорания топлива выделяют значительное количество угарного газа, сажи и других вредных летучих веществ. Применение инжектирования, закручивания потоков, искусственного дутья и даже введение чистого окислителя (кислорода) не решают задачу полного выгорания горючего. Это связано с кластерной природой строения газов. Известно, что реакция горения (окисления) топлива начинается на поверхности соприкосновения кластеров с кластерами окислителя и относительно медленно продвигается к центру кластеров. Теоретически требуется одновременное окисление молекул горючего. В настоящее время проблема разрушения кластеров до молекулярных структур частично решена (патенты №№2125682, 2160414, 2079786, ЕА 005632, а также патент РФ на полезную модель

№ 71732). При этом кулоновские силы со скоростью распространения электромагнитной волны дробят и перемешивают горючую смесь на более мелкие кластеры.

Известны различные способы повышения эффективности процессов горения, например, путем ионизации окислителя (воздуха), участвующего в процессе горения. В патенте ЕА 005632 предлагается перед подачей окислителя в зону горения ионизировать его, пропуская через решетку-электрод, снабженную истекателями электрических зарядов. Применение устройства по данному патенту дает возможность сократить затраты топлива в среднем на 0,5–1,5 %, повысить КПД тепловых агрегатов на 0,5–3%.

Предлагались также различные способы и устройства интенсификации процессов горения за счет электростатического распыления топлива в зону горения. Например, патенты РФ на изобретения №№2125682, 2160414, 2079786, а также патент РФ на полезную модель № 71732. В патенте № 2125682 интенсификация горения пламени осуществляется путем обработки пламени сильным продольным электрополем (2 кВ/см и выше) и вращающимся сильным поперечным электрополем, например, посредством трехфазной системы электродов и трехфазного высоковольтного источника. В патенте № 2160414 топливная горелка снабжена управляющим и рабочим подвижными кольцевыми электродами, топливная форсунка электроизолирована от корпуса и высоковольтное напряжение подано на эти электроды и форсунку.

В патенте № 2079786 факел пламени обрабатывают сильным электрическим полем, например, от регулируемого высоковольтного преобразователя (по напряжению и частоте), причем высоковольтные потенциалы электрополя подают через изолированную от топки и земли форсунку и электрод, электрически также изолированный от топочной камеры.

Используемые в этих патентах решения, позволяют незначительно повысить эффективность процессов горения, снизить затраты топлива, повысить КПД топливно-энергетических установок. Однако, во всех этих патентах предлагаются очень сложные конструкции электродов, отсутствуют указания по размещению электродов в объеме топки. Нет ссылок на научные исследования этих устройств. Такие конструкции трудно технически реализовать и использовать. При этом, в большинстве случаев, обработку электрическим полем предлагается вести или отдельно окислителя (ионизация воздуха), или собственно факела (пламени), где температурная ионизация и так развита глубоко. Такая постановка задачи усложняет устройства для интенсификации горения пламени и требует повышенных напряжений высоковольтного источника (30кВ

и более). Учитывая, что электрическое поле в горючей смеси распространяется после создания тихого разряда по принципу «домино» (как и искра поджигает любое количество горючего) и для горелок разной мощности практически не зависит от количества сжигаемого топлива, а только от вида топлива (в незначительной степени), нами предлагается дополнить любую горелку универсальным навесным устройством. Оно выполнено в виде закрепленного на горелке кольца-изолятора с высоковольтным электродом Г-образного типа, причем острие электрода помещают в область перед началом фронта пламени по продольной оси факела, где смесеобразование закончено, но кластерная система паров и газов не разрушена. В этом случае кулоновские силы электрического поля наиболее эффективно перемешивают и воздействуют на горючую смесь, что выражается, как показали наши исследования, при сжигании повышением температуры факела на 120–200°С и КПД тепловых агрегатов на 5–6%. Поставленную цель удастся достичь за счет того, что на выходе из горелки в области начала воспламенения происходит ионизация топливной смеси и разрушение кластерной системы паров и газов под воздействием импульсного электрического поля. При этом кулоновские силы со скоростью распространения электромагнитной волны дробят и интенсивно перемешивают горючую смесь на более мелкие кластеры, что выражается выше приведенными эффектами.

Таким образом нами решена задача повышения качества работы газовых плит, газовых пищеварочных котлов и автоклавов и других тепловых установок путем повышения эффективности процессов горения, протекающих в них при относительно простых устройствах интенсификации горения.

В результате экспериментальных исследований на лабораторной и опытно-промышленной установках предложено горелка, включающая корпус с воздухопроводом, топливопроводом и топливной форсункой, электрод, соприкасающийся со струей горючей смеси за соплом топливной форсунки, и маломощный источник высокого электрического напряжения, выполненная следующим образом:

- электрод может иметь Г-образную или линейную форму с острием на конце, который закрепляется с помощью кольца-изолятора на корпусе горелки;
- при этом электрод должен находиться в зоне начала воспламенения пламени;
- на электрод подается импульсное полупериодное напряжение от переменного источника тока через повышающий трансформатор и выпрямитель;

- напряжение высоковольтного источника U предлагается определять по формуле:

$$U = 0,7-0,9 U_{np} \cdot b,$$

где: U_{np} — напряжение пробоя для необводненной парообразной или газообразной топливной смеси 22–27 кВ/см; b — расстояние электрода от горелки, см; U — необходимое для создания тихого разряда напряжение высоковольтного источника, В.

Повышение эффективности работы тепловых установок с такими навесными устройствами для горелок удается достичь за счет того, что на выходе из горелки в области начала воспламенения происходит ионизация топливной смеси под воздействием импульсного электрического поля (от постоянного тока, несглаженного конденсаторами или индуктивностями). При этом мгновенно, со скоростью распространения электромагнитной волны, во всем объеме горючей смеси начинают действовать кулоновские силы отталкивания, интенсивно перемешивая горючую смесь. Потребность в избыточном количестве воздуха, естественно снижается до 1,0–1,05. Это приводит к одновременному горению факела во всем объеме при повышенной температуре и усилению лучеиспускания в видимой и ультрафиолетовой области. Нагрев рабочей поверхности, например, пищеварочных котлов уже происходит не только конвективным путем за счет более горячих газов, но в большей степени излучением факела. Количество угарного газа и несгоревших частиц углерода при хорошем смешивании смеси снижается, как и частота обслуживания наружной поверхности котлов. Экспериментально подтверждена теория и определены параметры эффективного сжигания топлива в присутствии электрического поля на лабораторной и опытно-промышленной установке при испытаниях в Санкт-Петербургском государственном институте низко-температурных и пищевых технологий. Известно, что даже незначительное количество ионизированной топливной смеси (например, 0,00001% от общего секундного расхода) достаточно для проявления эффекта «Домино», то есть ионизации всего объема факела. Учитывая, что скорость распространения ионизации кластеров факела близка к скорости света и практически не зависит от мощности высоковольтного источника (после достижения пороговой энергии ионизации смеси), возможно модернизировать таким образом любую горелку, изменяя лишь напряженность на электроде и устанавливая электрод в начало фронта воспламенения горючей смеси. Электрическая схема такого устройства в настоящее время позволяет произвести плавные регулировки даже в автоматическом режиме в зависимости от качества и вида топлива. Снижение количества дымовых газов

на 20% из-за уменьшения необходимого коэффициента избытка воздуха от 1,25 до 1,05 уменьшает количество холодного воздуха, которое необходимо предварительно разогревать в процессе сжигания. В целом при прежних параметрах теплопроизводительность тепловых аппаратов при том же расходе газа возрастет на 5–6% из-за более полного догорания угарного газа и меньшей загрязненности наружной поверхности котлов.

При этом кроме того наблюдается эффект электротермической интенсификации теплоотдачи. Заряженные от электрода ионы горючей смеси и дымовых газов притягиваются к заземленным тепловоспринимающим поверхностям аппаратов, теряют свой заряд и уступают место новым массам заряженных газов. Идет интенсивное разрушение пристенного ламинарного слоя греющих газов и, как следствие, увеличение коэффициента теплоотдачи. Таким образом, за счёт эффекта электроконвекции, заряженные горючие газы более интенсивно выполняет функцию переносчика тепла (на 8–12%).

Использование предлагаемых модернизированных горелок повышает эксплуатационные качества тепловых аппаратов, изменяя их тепловую производительность, экологичность, снижая металлоемкость и габариты газопроводов.

Сущность выполненных работ поясняется чертежами, схемами и графиками, приведенными на рисунках 1–5.

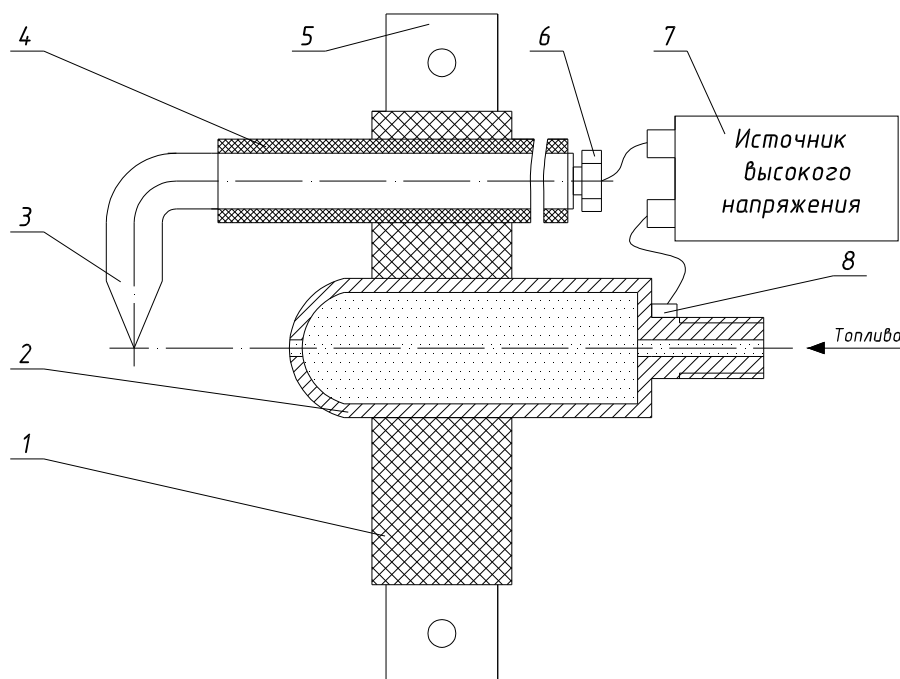


Рис. 1. Горелка с размещенным на ней электродом: 1 — кольцо-изолятор, выполненный из фарфора; 2 — топливная форсунка; 3 — электрод, выполненный из стальной проволоки; 4 — керамическая трубка; 5 — хомут-держатель; 6 — клемма; 7 — источник высоковольтного напряжения с защитным сопротивлением; 8 — клемма заземления.

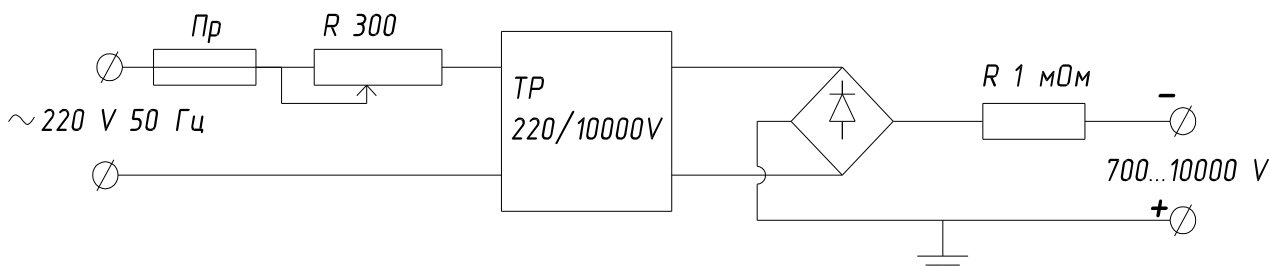


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема подачи напряжения на горелку.

Потребляемая мощность $N = 0,1-0,15$ кВт; выходной ток $I_{\text{вых}} = 0,01-0,03$ А ограничен сопротивлением $R = 0,1-1$ МОм мощностью 5–10 Вт для защиты от короткого замыкания и для безопасности персонала. Диодный мост — высоковольтный. Выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 700-10\ 000$ В. Плюс — на массу горелки, минус — на клемму электрода.

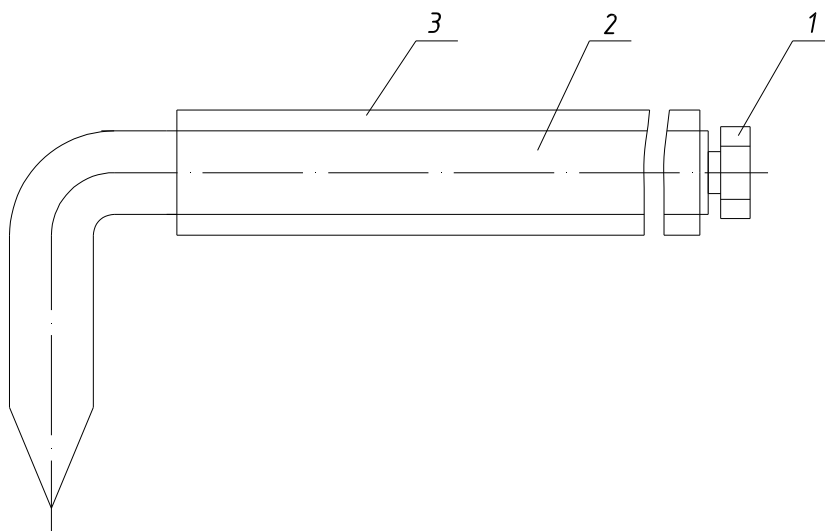


Рис. 3. Конструкция высоковольтного электрода:
1 — клемма; 2 — электрод; 3 — трубчатый изолятор.

Экспериментально авторами была подтверждена теория и определены параметры эффективного сжигания газового топлива в присутствии электрического поля. При этом обнаружено влияние не только увеличения яркости пламени, но и интенсификации теплоотдачи за счет электротермического эффекта, то есть разрушения пограничного слоя у стенок водогрейного котла заряженными частицами дымовых газов, в результате чего коэффициент теплоотдачи от них возрос на 8–12%. На рис. 5 изображен график изменения температуры жарочной поверхности газовой плиты от напряженности на электроде. Как видно, дальнейшее повышение напряженности нецелесообразно.

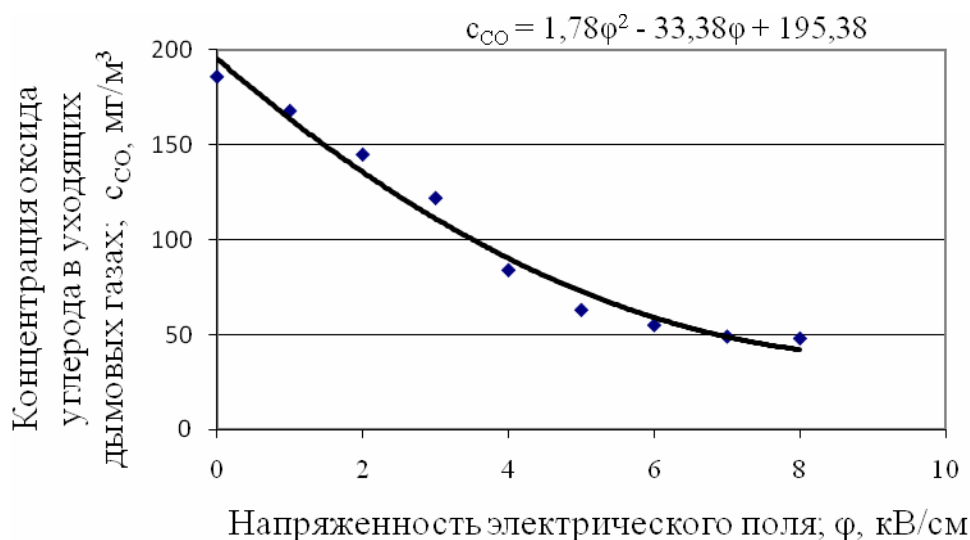


Рис. 4. График изменения количества угарного газа от напряженности на электроде (Испытания опытно-промышленной установки).

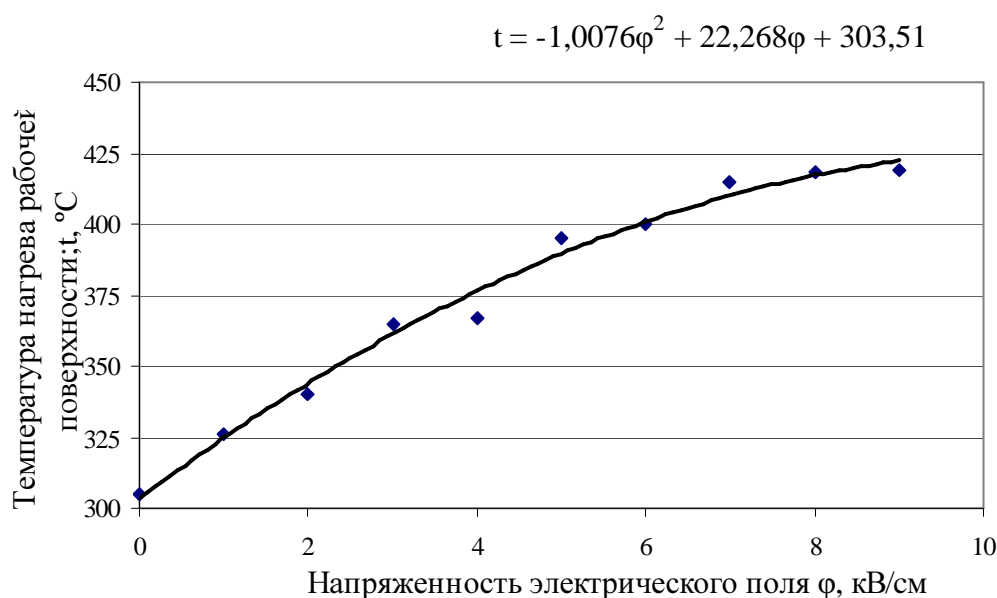


Рис. 5. График изменения температуры жарочной поверхности газовой плиты от напряженности на электроде.

Для расчета теплового баланса аппарата при наложении электрического поля на горючую смесь введен дополнительный коэффициент. При этом полезная теплопроизводительность тепловой установки при постоянном режиме и одинаковом расходе топлива возрастет и будет учтена для конвективного теплообмена (первое слагаемое уравнения) коэффициентом \mathcal{E} (определяется экспериментально, $\mathcal{E} = 1,08-1,12$), зависящим от напряженности поля в факеле (только до насыщения тока ионизации!). Этот коэффициент выводится экспериментально для каждого типа аппарата и учитывает интенсификацию конвек-

тивного теплообмена за счет электротермического эффекта (срыв и уменьшение толщины пограничной пленки дымовых газов у нагреваемой заземленной поверхности котла). Второе слагаемое уравнения показывает зависимость роста теплопроизводительности котла от температуры пламени.

$$Q_{mn} = \Delta Q_k + Q_l = [\Delta \alpha_k \cdot F_{mn} \cdot (T_{mn} - T_{mn})] + \varepsilon \cdot 5,67 F_{mn} \left[\left(\frac{T_{mn}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{mn}}{100} \right)^4 \right]; \text{ Вт} \quad (1)$$

где:

Q_{mn} — выделяемая тепловая мощность от поверхности нагрева (mn), Вт;

Считаем, что она равна мощности, подведенной от газов электроконвекцией и лучеиспусканием.

Q_k — выделяемая тепловая мощность конвекцией, Вт;

Q_l — выделяемая тепловая мощность излучением, Вт;

α_k — коэффициенты теплопередачи конвекцией при движении дымовых газов у поверхности нагрева без наложения электрического поля, Вт·м²/К);

F_{mn} — поверхность нагрева, м²;

T_{mn} — средняя температура поверхности нагрева, К;

T_{mn} — средняя температура теплоносителя, К;

ε — степень черноты поверхности нагрева.

Из формулы 1 просматривается вклад интенсификации конвективного теплообмена за счет электротермического эффекта (первая половина слагаемых формулы) и зависимость роста теплопроизводительности аппарата от температуры пламени (вторая половина слагаемых формулы).

Метод сжигания газового топлива в присутствии электрического поля приводит к интенсивному, практически мгновенному перемешиванию кислорода и газа, и одновременному сгоранию в более полном количестве, чем без электрического поля.

Скачкообразно увеличивается коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, что связано с повышением температуры факела из-за одновременного сжигания топлива во всем объеме факела.

Резко проявляется эффект снижения количества дымовых газов и соответственно, размеров газоходов теплового аппарата из-за уменьшения коэффициента избытка воздуха от 1,25 до 1,05. Пропорционально уменьшается количество поступающего холодного воздуха, которое необходимо предварительно разогревать в процессе сжигания.

Таким образом, разработано техническое решение по созданию принципиально новой модели тепловых установок пищевой промышленности, где обогрев осуществляется в основном за счет излучения, а также интенсификацией конвекции уходящих газов. При исключительно малых затратах энергии на создание электрического поля (менее 0,3–1,0% от потребляемой электрической мощности на работу приборов контроля и управления) обеспечивается возможность интенсификации передачи тепла жидкости или изделию на 5–6 % и более. Создана новая методика расчета предложенного аппарата. Благодаря точному введению электрода в определенную зону факела достигается эффект более глубокой очистки отходящих газов от токсичных, наносящих вред окружающей среде в виде "кислотных дождей", окислов серы, углерода и азота.

Предлагаемая конструкция горелки позволяет существенно повысить эффективность работы тепловых аппаратов пищевой промышленности с газовым обогревом и устранить в значительной степени недостатки известных серийных конструкций.

Список литературы

1. Макаров А.Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. [Текст]: монография / А.Н. Макаров. Ч. 1. Основы теории теплообмена излучением в печах и топках. Тверь: ТГТУ, 2007. 184с.
2. Павлов В.А. Обзоры и книги по проблемам физики и химии наночастиц, напечатанных на русском языке 1977-2005 годах. Известия СПбГУНиПТ 1, 2006. Стр. 7–13.
3. Учебник: Тепловое оборудование предприятий общественного питания. Липатов Н.Н. Ботов М.И., Муратов Ю.Р. — М.: Колос, 1994. — 431 с.
4. Дудышев В.Д. «Новая электроогневая технология — эффективный метод решения экологических и энергетических проблем» — «Экология и промышленность России» № 3/97г.
5. Кокшарова Т.Е. Основы научных исследований: Учебно-методическое пособие. — Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2007. — 111с.
6. Пурмал М.Я. Об интенсификации горения керосинового факела наложением электрического поля. Известия вузов. Энергетика, №8, 1981, с. 110–112.
7. Громцев С.А., Смирнов В.Г., Пурмал М.Я. Способ регулирования процесса горения и устройство для его осуществления. Описание изобретения. ВНИИГПЭ, А.С. № 1394000, 1986 г.

8. Амосова, М. А. Концепция совершенствования газовых пищеварочных котлов / М.А. Амосова, В.Т. Антуфьев // Международный сборник научных трудов факультета техники пищеварочных производств ГОУ ВПО СПбГУ-НиПТ «Теория и практика разработки ресурсосберегающего пищевого оборудования». 2006. Под редакцией профессора Пеленко В.В. Стр. 41.
9. Амосова, М. А. Теоретические исследования по созданию многофункциональных пищеварочных котлов повышенной эффективности / М.А. Амосова, В.Т. Антуфьев // III Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» («Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2007 г.) Материалы конференции. Стр. 690–963.