

УДК 621.435

## ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ С ПУЛЬСАЦИОННОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ

*Северянин В.С.*

### Введение

До широкого использования электрических водонагревателей, обусловленного получением электроэнергии на установках развивающейся ядерной энергетики, основным источником теплоты в настоящее время является процесс горения органического топлива, организованный в соответствующих теплотехнических устройствах.

Кроме мощных котлов на тепловых электростанциях, крупных котельных, различных технологических линиях, имеется значительный диапазон потребностей в агрегатах малой и средней мощности, например – в автономных далеко расположенных системах отопления, получения пара, горячей воды и других теплоносителей, а также в транспортных объектах, энергопоездах, экспедиционных сооружениях и т.д.

Естественно, к таким теплогенерирующим аппаратам предъявляются, в первую очередь, габаритно-весовые, экономические и экологические требования. Остаются общеэкономические и эксплуатационные: стоимость, надежность, удобство обслуживания, разнообразие типов топлива и применения в различных объектах без существенных изменений.

Одним из методов, позволяющих решить эти задачи, является так называемое пульсирующее горение [1, 2], представляющее собой физико-химический процесс тепловыделения при сжигании топлив в нестационарном газовом потоке.

Исследования установок с пульсирующим горением показали перспективность метода для ряда практических приложений. Ниже кратко излагаются основные свойства пульсирующего горения и несколько примеров новых практических разработок.

### Физические, конструкционные, технологические особенности пульсирующего горения

Проведенные исследования [1, 2] показывают следующее.

1. Интенсификация горения. Благодаря интенсивной турбулизации [3] скорость горения на порядок выше, чем при обычном стационарном горении.

2. Интенсификация конвективного теплообмена. Особенно важно для плотных котельных пучков, где малы числа Рейнольдса, обуславливающие этот процесс.

3. Автонадув. Устройство способно само снабжать себя воздухом, работая как насос, а также удалять продукты сгорания.

4. Очищающее действие на поверхности нагрева. При этом работает как струя газа, так и акустическая волна. Известен метод акустической очистки поверхности котлов [1], основанный на пульсирующем горении.

5. Уменьшение вредных выбросов. При минимальных коэффициентах избытка воздуха химические и физические недожоги отсутствуют.

6. Снижение температуры факела. Часть энергии топлива расходуется на механические колебания потока, поэтому энтальпия несколько снижается, облегчая работу материала топочной камеры.

7. Уменьшение эксергетических потерь. Эксергия реализуется для движения газового потока [4].

8. Теплофикационный эффект. Теплофикация – это передача теплоты потребителю после производства потоком механической работы. Поэтому самонадув экономичнее, чем действие дутьевых

вентиляторов и дымососов с электроприводом.

9. Стабилизирующее действие теплосъема из устройства на режим пульсаций [5] благодаря имеющимся амплитудно-фазовым соотношениям.

10. Распыление жидких струй. Пульсации газа резко интенсифицируют измельчение капель [6]. Это улучшает подготовку топлива к сжиганию до и в самой точке.

Основные параметры, характеризующие пульсирующий газовый поток в рассматриваемом явлении являются: частота пульсаций  $f$ , амплитуда давления  $\Delta P$ , амплитуда колебаний скорости  $\Delta w$ :

$$f = \frac{c}{4L}, \quad c = 20\sqrt{T}, \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{Q_H^p \cdot B}{4V \cdot f}, \quad \text{Па} \quad (2)$$

$$\Delta w = \frac{\Delta P}{\rho c}, \quad \text{м/сек} \quad (3)$$

где  $L$  – акустическая длина устройства,  $c$  – скорость звука,  $T$  – средняя температура,  $V$  – объем,  $B$  – расход топлива,  $Q_H^p$  – его теплота сгорания,  $\rho$  – плотность газа.

Несмотря на упрощения при получении выражений (1) и (2), точности их достаточно для оценки эксплуатационных характеристик. Средняя скорость потока определяется по расчету продуктов сгорания, переменная скорость – по акустическим зависимостям (3).

Вышеуказанные свойства пульсирующего горения применительно к огненным водонагревателям дают следующие особенности.

1. Видимое отсутствие топки, т.к. теплосъем возможен почти из факела, что резко сокращает габариты.

2. Устойчивый пульсационный режим позволяет применять разнообразные компоновочные решения (формы, расположение, сочетания).

3. Интенсивный теплообмен при холодном нагреваемом теплоносителе приводит к выпадению конденсата из продуктов сгорания.

4. Компактность и большие тепловые потоки увеличивают приемистость теплогенератора [8], т.е. улучшают пусковые характеристики и работу в переменных режимах.

5. Унификация по топливу. Благодаря пониженным требованиям к топливу (воспламенение, дожигание, распыление), устройствам доступен широкий диапазон качества топлива с минимальными переделками топливного и топочного оборудования.

6. Насосные качества газового тракта устройства используются для снижения расхода энергии на собственные нужды вплоть до отказа на вентиляторное воздушное дутье и удаление продуктов сгорания.

7. Акустические свойства требуют определенных геометрических соотношений по газовому тракту. Поэтому изменение тепловой мощности легче всего решать по модульному принципу, т.е. количеством установок.

8. Механические вибрации приводят не только к повышению коэффициента теплоотдачи, но и ускоряют закипание жидкостей. Это качество проявляется совершенно новым методом интенсификации рабочих режимов водонагревателей. Таким образом, пульсационное воздействие в рекуперативном теплообмене газ-жидкость не только усиливает тепловой поток на газовой стороне, что является обычным теплотехническим приемом, но и со стороны жидкости, при соответствующем конструктивном оформлении.

#### Теплогенератор водонагревателя

Особые свойства пульсирующего горения позволяют изготовить источник теплоты, так называемую камеру пульсирующего горения КПГ, - оптимально подходящую для малогабаритных интенсивных (большой удельной мощности) водонагревателей. Передача теплоты воде – через стенки резонансной трубы и камеры воспламенения, внутри которых резко интенсифицирована теплоотдача.

На рис. 1 (изображение сверху и снизу – изделие с разных ракурсов) представлена разработанная для малогабаритного котла КПГ. Главная особенность – свернутая в компактную спираль, выходящая из камеры воспламенения 1, резонансная труба 2. Аэродинамический воздушный клапан 3 не имеет движущихся частей. Форсунка или горелка 4 (см. далее) механического типа с регулируемым расходом топлива (соляр или газ – природный или любой другой). Факел поджигается искровой электросвечой 5. Патрубок 6 – это дренаж из камеры воспламенения 1 несгоревшего топлива. На схеме показаны основные размеры, при этом А – наиболее теплонапряженные части, В – движение воздуха, газов, звуковое излучение. КПГ испытывалось при расходе топлива 10–60 кг/час, частота пульсаций 30–70 герц, сила звука 105–110 дБ, температура газа на выхлопе 900–1100 °С, недожоги отсутствовали после доводки топливной системы.

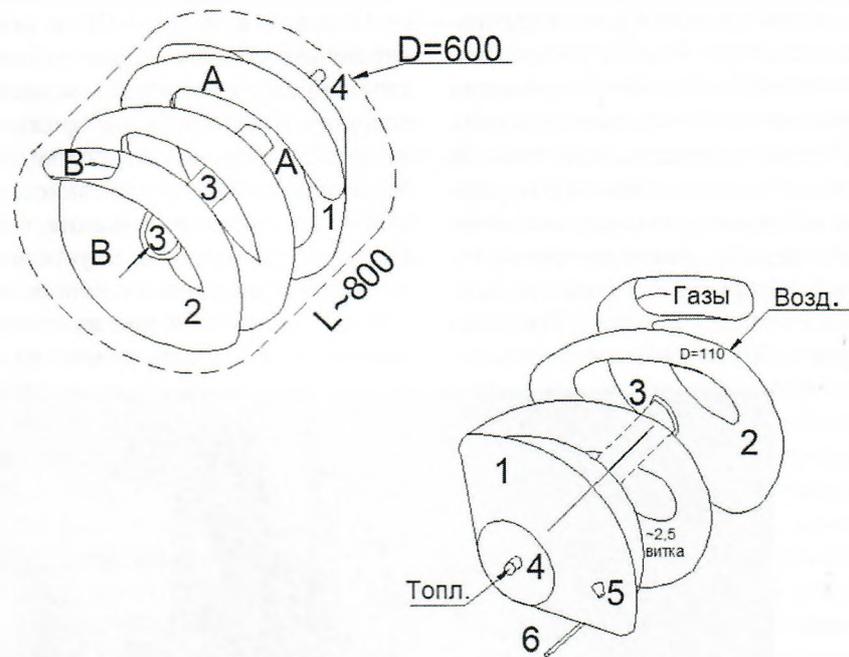


Рис. 1. КПГ

Сложность изготовления резонансной трубы с малым радиусомгиба из труб впоследствии привела к предложению изготавливать ее из листовой стали. Сварочные работы увеличились, но компоновки упростились.

Для работы на газообразном топливе низкого давления, что характерно для многих потребителей этого энергоресурса, было разработано горелочное устройство, показанное на рис. 2. Оно представляет собой механический клапан. Для

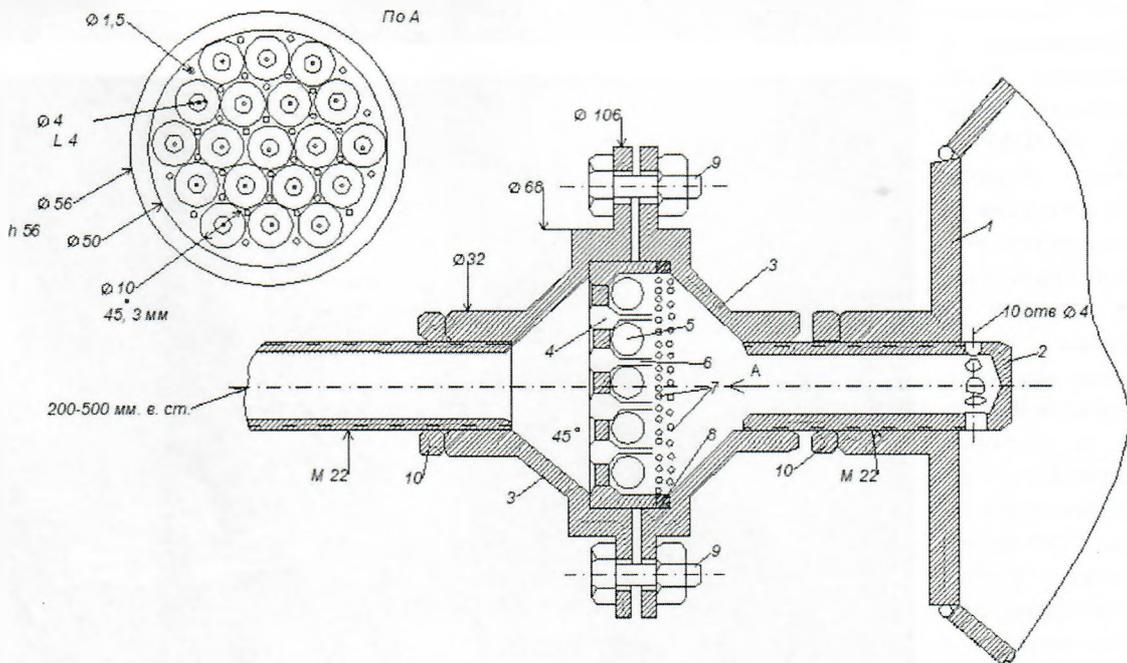


Рис. 2. Подача газа

повышения надежности и долговечности работы устройства запирающий орган выбран в виде шариков из тефлона диаметром 8 мм, в количестве 19 штук. В КППГ 1 введена горелка 2, имеющая 10 отверстий диаметром 4, что позволяет подать на горение достаточное количество газа низкого давления. Крышки 3 клапана фиксируют корпус 4 клапана, в каналах которого располагаются шарики 5. С одной стороны они ограничены отверстиями в корпусе 4, с другой – сеткой 7 из нихромовой проволоки с ячейкой 1–2 мм. Сетка 7 закреплена на штырях 6. Ход колебаний шариков – 3–4 мм. Элементы 8, 9, 10 – сборочные. Основные размеры, принятые при изготовлении, показаны по схеме. Так как шарики работают разными участками своей поверхности при контакте с отверстиями корпуса 4, поворачиваясь и вращаясь, то время эксплуатации этого горелочного устройства значительно больше работы других типов механических клапанов (лепестковых, флажковых и т.п., которые были использованы, например, на ФАУ-1). Материал шариков (тефлон и т.п.) так же увеличивает ресурс.

Представленная газовая горелка с описанным клапаном легко заменяется жидкостной форсункой, и наоборот. Это упрощает эксплуатацию теплогенератора. Горелочное устройство удобно в эксплуатации, легко ремонтируется, с применением возобновляемых шариков.

### Водогрейный котел

Описанная выше КППГ с упомянутыми усовершенствованиями была установлена в экспериментальном водогрейном котле, внешний вид которого в действии изображен на фотографиях рис. 3. Цель исследования, проведенного на Минском заводе отопительного оборудования – проверить схемные решения, особенности изготовления, монтажа, эксплуатации.

Котел представлял собой цилиндр диаметром 600 мм длиной 780 мм из листовой стали толщиной 10 мм. Петли резонансной трубы распо-



Рис. 3. Водогрейный котёл

лагались по периферии окружности цилиндра, а внутренняя осевая часть – воздухопровод, в который выведен аэродинамический клапан. На нижней фотографии в центре виден светящийся факел, сориентированный напротив аэродинамического клапана. Выход продуктов сгорания – наклонная труба над цилиндром. На верхней фотографии показан подвод холодной воды и отвод горячей (правый торец цилиндра, на котором расположен топливопривод к форсунке, которая установлена на стенке камеры воспламенения).

КПГ конусного типа смонтирована своей камерой воспламенения на правом торце, выход резонансной трубы – у левого торца (см. верхний снимок). Там же, по оси установки – подача воздуха в режиме самовсаса. Пусковой воздух – удаляемый воздушный шланг от внешнего вентилятора малой мощности. Топливная система (топливный бак, насос с электроприводом, фильтр, вентили, манометр) и электросхема (свеча зажигания, трансформатор, переключатели, элементы безопасности) можно собрать в отдельном энергоблоке. Все это вспомогательное оборудование легко обеспечивается дистанционным управлением и автоматикой.

Во время испытаний получены следующие параметры и характеристики.

Расход воды – 6 т/час, температура холодной воды 9 °С (опыты велись в зимнее время, трубопровод от водопровода технической воды проле-

гал открыто), температура горячей воды 32 °С, длительность данного опыта – 1 час. Расход топлива (соляр) – 15 кг/час, тепловая мощность по топливу 170 кВт. КПД по тепловому балансу 80–90 %. давление топлива перед форсункой 5/10 атм. Температура уходящих газов 120–150 °С. Оценка силы звука – 90–110 дБ. Пульсации устойчивые в большом диапазоне нагрузок (от 50 % до 120 % относительно исходного уровня).

Представленный на рис. 3 водогрейный котел может быть рекомендован (естественно, с определенными доработками по требованию заказчика) как высокофорсированный теплогенератор.

Вместе с тем он может быть базой для создания более мощных и эффективных энергоагрегатов, примером которых является конструкция по рис. 4.

Для снижения звукового излучения от агрегата предлагается использовать противофазную компоновку, когда генерирующие гармонические колебания элементы автоматически настраиваются так, что при максимуме давления в одном получается минимум в другом. Поэтому две КПГ, установленные своими аэродинамическими клапанами навстречу друг другу, кроме увеличения общей тепловой мощности, могут снизить шумовое загрязнение окружающей среды. Конструкция на рис. 4 – это не что иное как сдвоенная система по рис. 3, по упомянутому модульному принципу.

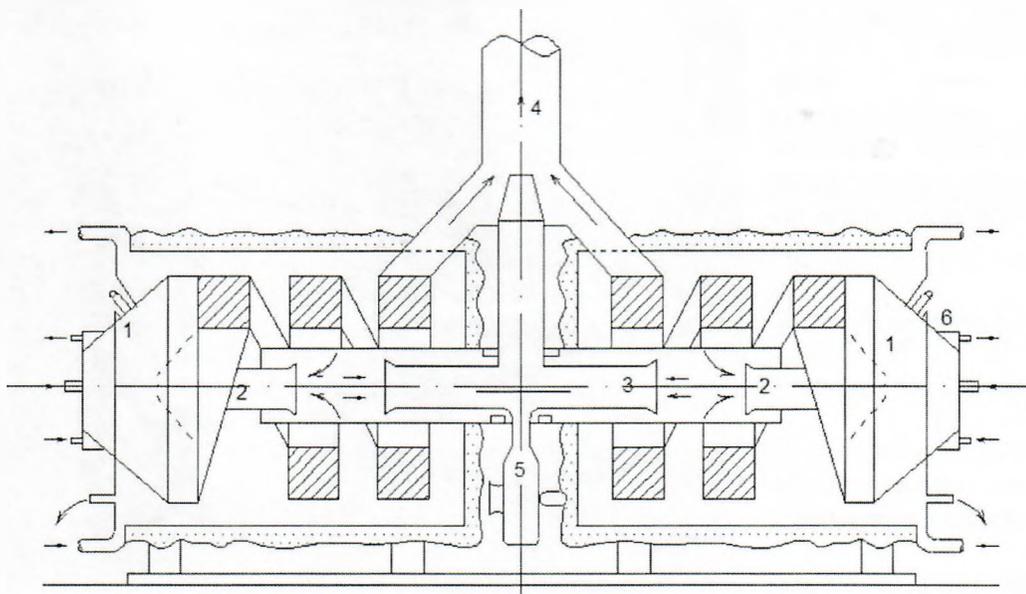


Рис. 4. Сдвоенный котёл

Две КПП 1, имеющие свергнутые резонансные трубы квадратного сечения, между витками по оси – аэродинамические клапаны 2, направленные на напорную трубу 3, которая входит в выхлопную трубу 4. К напорной подсоединен вентилятор 5. Для сжигания тяжелого топлива (мазут) имеется подогреватель 6. Для удержания противофазного режима, как показали опыты, необходимо соответствие тепловой работы (в основном – температуры) в обеих КПП, см (1). Это достигается равенством подачи топлива при помощи простого регулятора (датчик частоты, компаратор, вентили).

При работе напорная труба 3 эжектирует выхлопные газы, чем улучшается действие КПП. Описываемая конструкция целесообразна для дальнейшего совершенствования водоподогревателей с пульсационной интенсификацией по газовой стороне.

#### Вибрационный нагреватель

Выше было указано на возможность интенсификации теплоотдачи вода – стенка при пульсирующем горении. Обычно теплоотдача вода – стенка намного сильнее теплоотдачи стенка – газ, поэтому в первую очередь стремятся усилить процесс с газовой стороны.

В самом деле, коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи с газовой и водяной стороны,  $\alpha_1 \ll \alpha_2$ ;  $\delta$  – толщина стенки,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стены. Слагаемое  $\delta / \lambda$  намного меньше других слагаемых в знаменателе, поэтому

$$K \approx \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \approx \alpha_1 \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \approx \alpha_1,$$

т.к.  $\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \approx 1,$

т.е. обычно теплообмен обусловлен процессом с газовой стороны.

Однако при резком росте  $\alpha_1$ , что дает пульсационный

режим течения газа при пульсирующем горении топлива в теплогенераторе водонагревателя, для увеличения  $K$  уже нужно увеличивать и  $\alpha_2$ .

Известны различные методы усиления теплоотдачи жидкость – стенка (скорость, колебания, пульсации, вихри, химические и физические добавки, давление, повороты, мешалки и т.д.). Но устройства пульсирующего горения, кроме акустического шума, выделяют еще одно технологическое явление – вибрации. Это колебания различных элементов (в основном плоских стенок) с различной амплитудой, зависящей от жесткости, массы, формы, крепления и т.д. В соприкасающейся с таким элементом жидкости погранич-

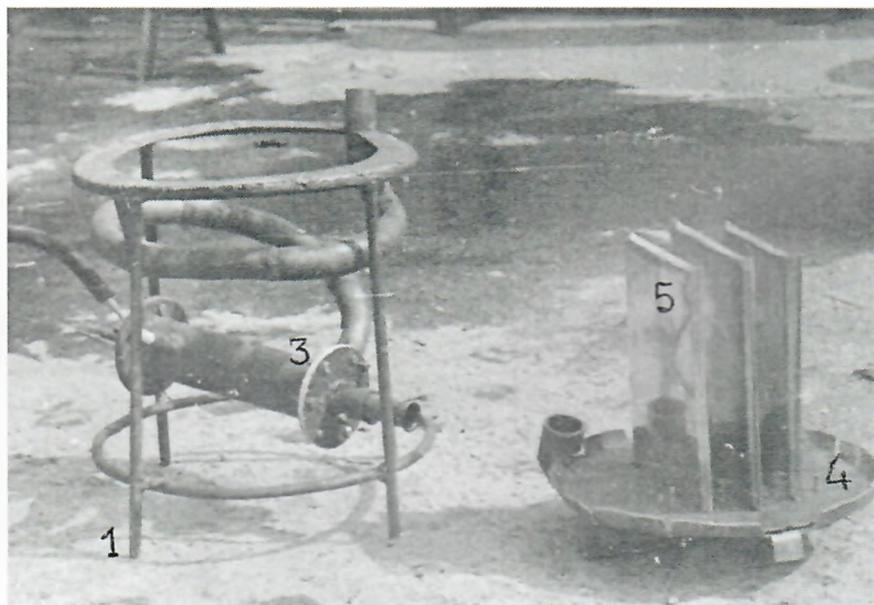
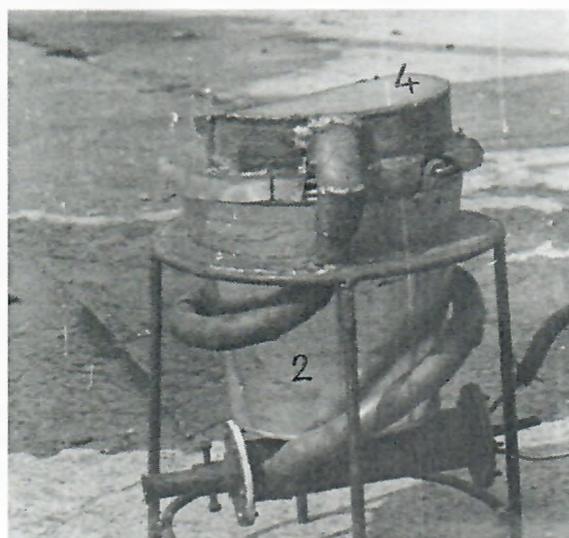


Рис. 5. Вибрационный нагреватель

ный слой утончается, разрушается, усиливается молярный и молекулярный перенос, т.е. увеличивается  $\alpha_2$ . Задача заключается в соответствующем правильном конструировании теплообменника.

Разработанный в Брестском техническом университете вибрационный водонагреватель представлен на рис. 5. В корпусе 1 расположена съемная емкость 2 (ведро). Снизу корпуса 1 закреплена КПП 3, работающая на газообразном топливе (пропан – бутан из баллона), подаваемом шлангом, с давлением после редуктора 0,1–0,5 атм. Резонансная труба КПП спирально охватывает и фиксирует емкость 2. Справа от КПП виден воздушный аэродинамический клапан, через который вводилась пусковая электросвеча или небольшой пусковой факел. Емкость 2 сверху закрывается крышкой 4, верхняя часть которой – коллектор, в который вставляется конец резонансной трубы КПП. Снизу к крышке 4 прикреплены три плоских коробки теплообменника 5. Коробки изготовлены из жести толщиной 0,5 мм, размер коробки 200×100×10 мм. Полость каждой коробки соединена с полостью коллектора на крышке 4, а щелевой выход – на задней стенке. Ход газа внутри коробки – из коллектора вниз, поворот, выход сверху крышки 4. На нижней фотографии крышка 4 с теплообменником 5 показана в перевернутом виде. При работе КПП выхлопные газы создают вибрацию стенок коробок теплообменника 5 с амплитудой по центру плоскости порядка 0,1–0,5 мм в зависимости от режима КПП.

В испытаниях сравнивались процессы с вибрациями и без вибраций (в последнем случае

между коробками вставлялись ребра, препятствующие вибрациям, и скреплялись обматывающей проволокой). При одинаковом расходе топлива зафиксирован интересный результат: при вибрациях появление пузырьков в воде (фиксатор кипения) начиналось на 10–20 % по времени раньше, чем без вибраций. Общая температура и энтальпия воды поднимались одинаково. Поэтому такое псевдокипение означает интенсификацию тепломассообмена. Кроме того, теплообменник самоочищается при загрязненной жидкости.

Описываемый вибрационный нагреватель, безусловно, требует доводки (универсальность, внешний вид, коммерческие качества и т.д.), но главное значение этой разработки – новое направление совершенствования теплотехнических устройств.

### Выводы

1. Представленные свойства особого метода сжигания топлива – так называемого пульсирующего горения – открывают перспективу в создании теплогенерирующих устройств малой и средней мощности для удовлетворения запросов многочисленных потребителей теплового оборудования.

2. Конструкция и эксплуатация водонагревателей в виде водогрейных котлов малой и средней мощности сравнительно просты, надежны, универсальны.

3. Для интенсификации теплообмена в устройствах с пульсирующим горением можно использовать вибрацию отдельных элементов устройств, что является новым предложением в развитии теплотехнического оборудования.

### Литература

1. Попов, В.А. Технологическое пульсационное горение / Попов В.А., В.С. Северянин, А.М. Авакумов. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.
2. Северянин, В.С. Установки пульсирующего горения / В.С. Северянин // Вестник Московского государственного технического университета. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1995. – №1. – С. 32–40.
3. Северянин, В.С., О скорости обдувания твердой частицы в пульсирующем потоке газа / В.С. Северянин // Инженерно-физический журнал, том XXII, №1. – Минск, 1972. – Стр. 166–167.
4. Северянин, В.С. Камеры пульсирующего горения – генераторы теплоты к механической энергии / В.С. Северянин // Журнал ИНЖЕНЕР-МЕХАНИК. – №2. – 2017. – Стр. 13–17.
5. Северянин, В.С. О нагревателях с пульсирующим горением / В.С. Северянин // Журнал Энергетика, Известия ВУЗов. – №5. – 1974. – Стр. 142–146.
6. Северянин, В.С. Распыление топлива пульсирующим газовым потоком / В.С. Северянин // ЭНЕРГЕТИКА, Известия ВУЗов. – №9. – 1991. – Стр. 114–120.
7. Северянин, В.С. Оценка амплитуды давления при пульсирующем горении / В.С. Северянин, В.М. Яскевич // Журнал ЭНЕРГЕТИКА, Известия ВУЗов. – №2. – 1983. – Стр. 89–90.
8. Северянин, В.С. Приемистость устройств пульсирующего горения / В.С. Северянин // Журнал ИНЖЕНЕР-МЕХАНИК. – №4. – 2017. – Стр. 5–9.