

УДК 541.162

# КАМЕРЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ – ГЕНЕРАТОРЫ ТЕПЛОТЫ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Северянин В.С.**Брестский государственный технический университет*

## Введение

Пульсирующее горение (*pulsating combustion*), известное сравнительно давно, впервые использованное в военной технике (самолеты-снаряды ФАУ-1 с пульсирующим двигателем 40 гг. XX в.), имеет ряд особенностей. Это, во-первых, очень высокая плотность тепловыделения  $BQ_H^p / V$  ( $B$  – расход топлива,  $Q_H^p$  – его теплота сгорания,  $V$  – топочный объем), высокий КПД процесса горения (отсутствуют недожоги), возможность так называемого самовсаса воздуха (отсутствие дутьевых устройств с их электропотреблением), генерация высокоскоростного потока газообразных продуктов сгорания. Во-вторых – простота конструкции и эксплуатации, разнообразие технических приложений для обслуживания тепловых агрегатов, комбинаций с другими огнетехническими устройствами. Основной недостаток – шум и вибрации подавляются до приемлемого значения известными способами, а высокие уровни тепловых потоков утилизируются соответствующим охлаждением обрабатываемыми потоками.

Аппараты, реализующие пульсирующее горение, принято называть камерами пульсирующего горения – КПП (*pulsating combustion chamber*). Известны многочисленные конструкции КПП [1], при этом пульсационный режим почти всех КПП обусловлен их аэродинамическими, геометрическими акустическими свойствами [2, 3]. Как теплогенерирующие элементы они могут использоваться в малой, коммунальной и большой энергетике, а как двигатели – в авиации, реактивной технике. Если первое изучено достаточно для практического применения, то второе – только пока узкая сфера спецтехники. Поэтому целесообразно рассмотреть это двойное качество КПП

для создания усовершенствованной теплотехнической продукции.

## Теплогенерирующие особенности пульсирующего горения

Характеризуя кратко особенности пульсирующего способа горения органического топлива в специальных устройствах – КПП, следует подчеркнуть следующее.

1) В диффузионной области реагирования, преобладающей для топочной техники, скорость горения, т.е. теплонапряжение топочного объема, зависит в первую очередь от смесеобразования, турбулизации, обдувания топлива окислителем, что реализуется в КПП намного интенсивнее, чем в стационарном потоке.

2) Конвективный теплообмен между факелом и соприкасающимися с ним телами настолько интенсивен, что сокращает поверхности утилизирующие теплоту, в несколько раз. Работу металла конструкции КПП облегчает некоторое снижение радиационного потока, т.к. светимость факела уменьшается. Часть энтальпии потока расходуется на механическую энергию колебаний, это снижает температуру газа. Исследования показали примерно десятипроцентное снижение радиационной нагрузки на ограждения.

3) Сильная турбулизация потока позволяет сжигать низкосортные, загрязненные топлива. Распыливающее действие колеблющегося потока ведет к возможности упрощения топливной системы (снижение давления перед форсункой, вплоть до отказа от форсунки, слоевое горение).

4) Интенсивный автоколебательный процесс приводит к возможности унификации по топливу, когда в одной и той же конструкции можно сжигать широкую гамму топлив, при этом сбли-

жаются эмиссионные характеристики факелов. Например, переход с жидкого на газообразное топливо требует замены только форсунки на газовую горелку.

5) Так как КПГ могут действовать в режиме самостоятельного обеспечения воздухом и удалением продуктов сгорания, то обеспечивается снижение расхода энергии на собственные нужды. Необходимы только пусковые вентиляторы, а в рабочем режиме расход электроэнергии на тягу и дутье может быть сведен к нулю.

6) КПГ допускают любую ориентацию, изменение формы, любые стыковки с обслуживаемыми агрегатами. Гибкость компоновочных решений допускает широкое применение КПГ.

7) Если в обычных топках эксергетический КПД ничтожно мал (нет работоспособности потока на выходе из топки), то КПГ, создавая струю газов, позволяет утилизировать и механическую работу (например, аналог – ПуВРД – пульсирующий воздушно-реактивный двигатель; бескомпрессорные ГТУ – газотурбинные установки, см. далее).

Теплофизические характеристики мощной камеры пульсирующего горения оцениваются такими данными [4]:

Расход топлива.....	5300кг/час
Частота колебаний.....	31–33 Гц
Амплитуда давления.....	0,2 кг/см <sup>2</sup>
Теплонапряжение топочного объема.....	(3,9–7,0)·10 <sup>6</sup> Вт/м <sup>3</sup>
Уровень звука возле КПГ.....	107 Дб
..... панель управления.....	89 Дб

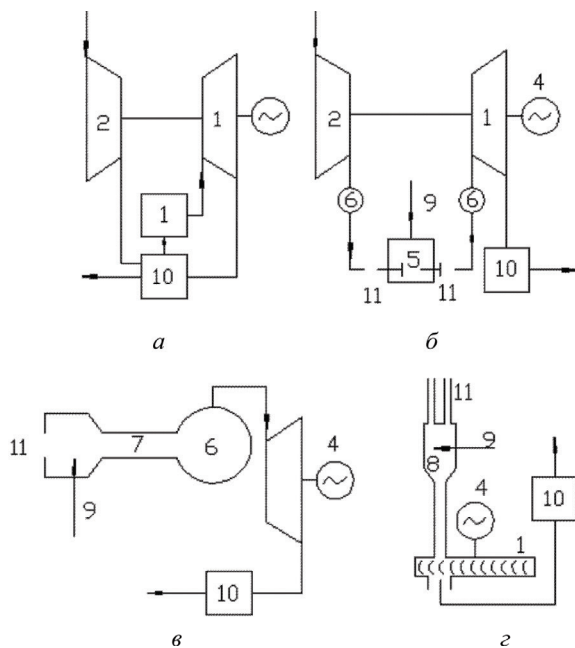


Рис. 1.

Это крупная двухфазная КПГ была создана и испытана Бабкиным Ю.Л., опытная эксплуатация ее показала большие возможности теплогенерации методом пульсирующего горения. Выявились и некоторые недостатки – шум и вибрации, что определило последующие работы по совершенствованию новой высокофорсированной топочной техники.

### Варианты утилизации кинетической энергии пульсирующего потока

С точки зрения термодинамики камеру пульсирующего горения можно рассматривать как тепловую машину, в которой часть подводимой за счет горения теплоты переходит в работу, совершаемую газом. Величина этой работы, относительно подведенной теплоте, оценивается термодинамическим коэффициентом полезного действия. Проиллюстрировать эти зависимости удобно на примере ГТУ (газотурбинных установок), предназначенных для выработки механической (электрической) энергии.

На рис. 1 показаны обсуждаемые схемы ГТУ: «а» – ГТУ постоянного давления, «б» – ГТУ постоянного объема [5], «в» – ГТУ с камерой сгорания в виде КПГ с механическим клапаном, «г» – ГТУ с камерой сгорания в виде КПГ с аэродинамическим клапаном. Обозначения: 1 – турбина, 2 – компрессор, 3 – камера сгорания, 4 – нагрузка (электрогенератор), 5 – клапанная камера, 6 – ресивер, 7 – КПГ-МК (мех. клапан), 8 – КПГ-АК (аэродин. клапан), 9 – топливо, 10 – потребитель тепла (теплообменник), 11 – клапаны.

Подразумевается термодинамическая идентичность схем «б», «в», «г» (последние две – без компрессора). Описание действия ГТУ приводится в различных источниках [5].

Термодинамический КПД ГТУ  $\rho = const$  (цикл Брайтона), схема «а»:

$$\eta_t^b = 1 - \frac{1}{\beta^k},$$

для ГТУ  $\nu = const$  (цикл Аткинсона), схема «б»:

$$\eta_t^a = 1 - \frac{1}{\beta^k} \cdot \frac{k \lambda^{1/k}}{(\lambda - 1)} \quad (1)$$

(здесь  $k$  – показатель адиабаты,  $\beta$  – степень повышения давления в компрессоре,  $\lambda$  – то же в камере сгорания) [5].

Для бескомпрессорной ГТУ с КПГ, где повышается давление  $\lambda$ , а  $\beta = 1$ , из (1) имеем:

$$\eta_t = 1 - k \frac{\lambda^{1/k} - 1}{\lambda - 1}. \quad (2)$$

Выражение (2) дает возможность оценить величину работы газового потока после КПГ как долю теплоты использованного топлива.

Для примера рассмотрим установку с расходом топлива 100 кг/час (соляр), на которой получена амплитуда колебания давления 0,3 Бар. На ней теоретически можно получить:

$$\eta_t = 1 - 1,35 \left[ \left( \frac{1,3}{0,7} \right)^{1,35} - 1 \right] / \left( \frac{1,3}{0,7} - 1 \right) \approx 0,1,$$

т.е. порядка 10% выделенной при сжигании топлива энергии в идеальном случае можно передать, например, на привод вентилятора для перемещения подогретого воздуха, или напрямую горячие газы в теплообменник.

Схематично этот процесс показан на рис. 2, где сравниваются варианты действия теплообменника от КПГ и от камеры сгорания, питающейся воздухом от внешнего вентилятора, т.е. два варианта наддува. Обозначения: КС – камера сгорания (на верхней схеме «а» это КПГ, на нижней «б» – камера сгорания постоянного давления), ТО – теплообменник, ТЭС – теплоэлектростанция, ЭП – электропередача, ДВ – двигатель, ВР – вентилятор,  $T_{\text{н}}$  – топливо, расходуемое на перемещение газа,  $T_{\text{н}}$  – для нагрева и перемещения,  $B_1$  – расход топлива на КПГ,  $B_2^{\text{ТЭС}}$  – топливо на ТЭС для перемещения,  $B_2^{\text{УСТ}}$  – топливо на установку,  $Q_{\text{н}}$ ,  $Q_{\text{п}}$  – теплота для перемещения и нагрева, ПС – продукты сгорания,  $V_3$  – воздух. Индексы: 1 – для схемы с КПГ, 2 – наддув вентилятором.

При  $(Q_{\text{н}})_1 = (Q_{\text{н}})_2$  и одинаковых теплообменниках:  $(T_{\text{н}} + T_{\text{п}}) > T_{\text{нп}}$ , т.к. для ТЭС с КПД менее 40 % требуется больший расход топлива  $B_2^{\text{ТЭС}}$ . Поэтому нагрев теплоносителя в схеме с КПГ идет с меньшими топливными затратами, чем в обычных схемах.

Какое количество, например, воздуха, может быть нагрето при горении в КПГ, дается по соотношениям водяных эквивалентов газа и воздуха:

$$\frac{W_{\text{в}}}{W_{\text{г}}} = \frac{\Delta T_{\text{г}}}{\Delta T_{\text{в}}}$$

( $\Delta T_{\text{в}}$  – принять величину нагрева воздуха,  $\Delta T_{\text{в}} = 50^\circ$ , охлаждение газа в ТО принять  $\Delta T_{\text{г}} \approx 700^\circ$ ).

Тогда расход воздуха:

$$V_{\text{в}} = \frac{W_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{B V_{\text{г}} \rho_{\text{г}} c_{\text{г}} \Delta T_{\text{г}}}{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta T_{\text{в}}} \approx 17000 \text{ м}^3/\text{час}$$

(расход топлива  $B$  – по предыдущему примеру,  $\rho$  и  $c$  – табличные плотности и удельные теплоемкости,  $V_{\text{г}}$  – выход газа на 1 кг топлива).

Тепловая мощность этой КПГ:

$$N = B Q_{\text{н}}^{\text{П}} = 100 \text{ кг/ч} \times 10000 \text{ ккал/кг} \approx 10^6 \text{ ккал/ч} \approx 10^6 \text{ Вт (выделение теплоты)}$$

Согласно (2), КПГ может предоставлять для перемещения  $(Q_{\text{п}})_1$  количества механической энергии:

$$(Q_{\text{п}})_1 = N \times \eta_t = 10^3 \times 0,1 \text{ кВт} = 100 \text{ кВт}$$

В то же время вентилятору потребовалось бы для подачи этого, нагретого количества воздуха:

$$N_{\text{ВР}} = \frac{V_{\text{в}} \cdot H}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_{\text{в}}},$$

где  $V_{\text{в}}$  – расход воздуха;  $H$  – напор, принять 1 кПа;  $\eta_{\text{в}}$  – КПД вентилятора, а именно:  $N_{\text{ВР}} \approx 8 \text{ кВт}$ .

Таким образом, даже с учетом неучтенных потерь из-за необратимости процесса, при меньших амплитудах колебания давления, энтропийных потерь, низких внутренних относительных аэродинамических КПД, - энергетические соотношения  $(Q_{\text{п}})_1 \gg N_{\text{ВР}}$  вполне благоприятны для постановки конструкторских задач с целью применения устройств пульсирующего горения как генераторов механической энергии.

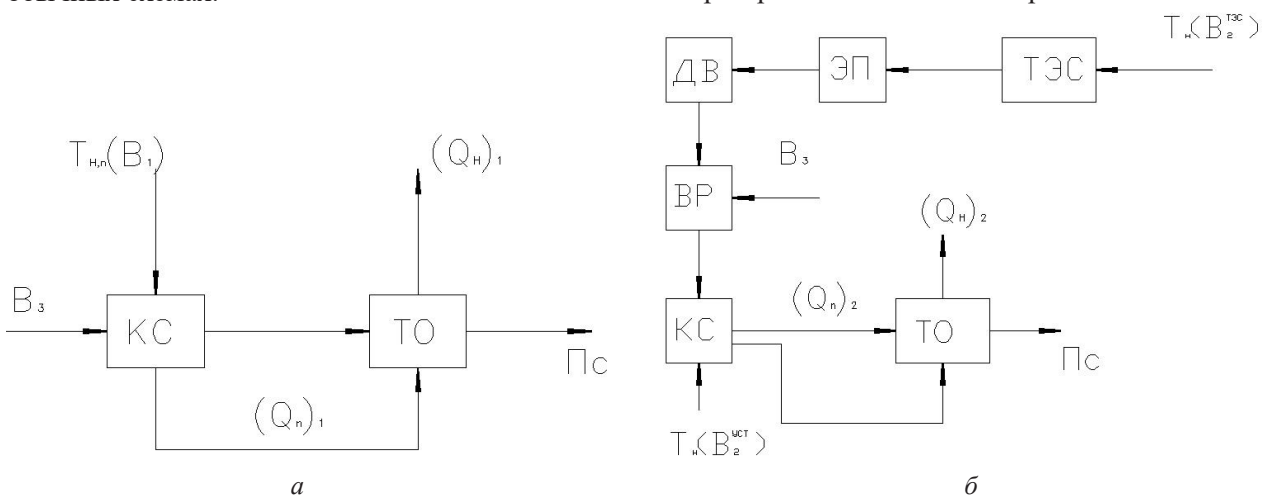


Рис. 2.

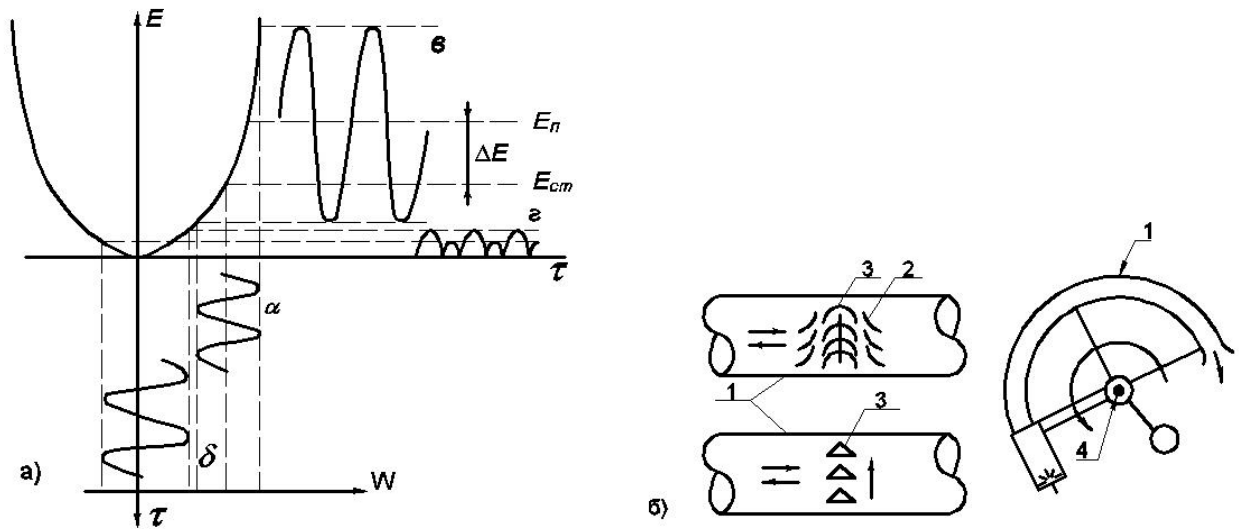


Рис. 3.

**Реализация двойного действия КПП**

Выработка механической энергии нестационарным потоком поясняется графически на рис. 3. Здесь а – количественные нестационарные зависимости, б – некоторые конструкции движущихся механизмов.  $E$  – кинетическая энергия потока, квадратично зависящая от скорости  $W$ , изменяющейся во времени  $\tau$ . Линия «а» – это изменение по синусоиде по координате  $\tau$ , повернутой на  $90^\circ$ , линия «б» – скорость  $W$  с обратным потоком (выброс из аэродинамического клапана или знакопеременное течение в каналах КПП), линия «в» – энергия от «а» как функция  $W$ , линия «г» – то же для знакопеременного течения.

Следует обратить внимание на  $\Delta E$  – приращение уровня энергии  $E_{п}$  относительно уровня энергии при стационарном течении  $E_{ст}$  (благодаря нелинейности  $E = f(\omega)$ ). Линия «г» показывает учет энергии и при обратном течении потока.  $E_{п}$  построена по полусумме отклонений «в».

На схемах б) представлены: 1 – газовый канал (слева неподвижный, справа – вращающийся на оси 4 с противовесом), 2 – направляющие лопатки, 3 – рабочие лопатки газовой турбины. Стрелки – движение газа и механизмов.

Если изображенные слева конструкции гипотетические, то конструкция справа успешно реализована, испытана и предлагается к использованию в качестве теплогенератора с минимальным расходом энергии на собственные нужды.

На основании вышеупомянутой схемы-конструкции рис. 4 представляет воздухонагреватель смешительного типа (смесь воздуха и чистых продуктов сгорания, характерных для КПП). Кроме того, воздух нагревается от горячих стенок КПП, охлаждая ее. КПП образует вращающийся ротор и состоит из камеры сгорания 1 с резонансной трубой 2, изогнутой по окружности. Камера установлена в подшипниках 3, снабжена неподвижной форсункой 4 и аэродинамическим клапаном 5 трубчатого типа, пусковой электросвечой со скользящими контактами. На корпусе камеры 1 установлены по периферии вентиляторные лопатки 6. Обрамляющий короб 7 образует канал 8 для прохода горячего газового теплоносителя [6]. КПП действует как реактивная установка, выхлопная струя из 2 создает вращающий момент и интенсивную турбулизацию. Расход топлива – 10 кг/час (соляр), скорость вращения – 500 об/мин, расход воздуха и газа порядка  $700 \text{ м}^3/\text{час}$ , температура потока  $80\text{--}200^\circ\text{C}$ .

Разработанное устройство целесообразно использовать для обогрева теплиц, строящихся объектов, в сушилках различного назначения, обработки сельхоз. помещений и т.п.

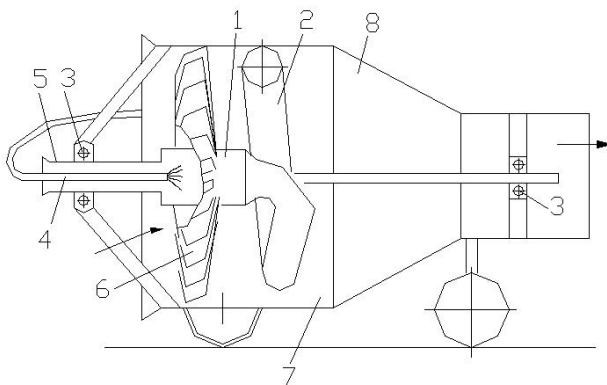


Рис. 4.

### Выводы

Газовый поток, генерируемый камерами пульсирующего горения, целесообразно использовать для транспортировки теплоносителя, нагреваемого этим же потоком.

Интенсивное тепловыделение в камере пульсирующего горения допустимо по условиям работы металла благодаря охлаждению нагревающимся воздухом.

Отказ от тяго-дутьевых устройств с электроприводами снижает расход энергии на собственные нужды при использовании камер пульсиру-

ющего горения как теплогенераторов, так и побудителей перемещения теплоносителей за счет выработки механической энергии.

Генераторы теплоты и механической энергии, несмотря на низкий термодинамический КПД получения работы, имеют общий высокий КПД использования топлива, обусловленный утилизацией теплоты. Действие камер пульсирующего горения в таком качестве аналогично известному методу комбинированной выработки тепла и электроэнергии на ТЭЦ или на когенерационных установках с ДВС.

### Список использованных источников

1. Технологическое пульсационное горение / Попов В.А. [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 317 с.
2. Северянин, В.С. Аэродинамическая структура устройств пульсирующего горения / В.С. Северянин // Изобретатель. – №7–8, 2016. – С. 43–49.
3. Северянин, В.С. Котлы с пульсирующим горением / В.С. Северянин // Энергетика. – №1, 2001. – С. 79–85.
4. Severyanin, V.S. Prospects for pulsating combustion in power engineering / V.S. Severyanin. – First International Symposium on Pulsating Combustion. Proceedings. University of Sheffield, England. – 1971.
5. Теплотехнический справочник, т. I / Под ред. В.Н. Юренева. – М.: Энергия, 1975.
6. Устройство для пульсирующего сжигания топлива: а.с. 870854 СССР, F23 с11/04, 1981 / В.С. Северянин.