

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

САРАТОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

СЕВЕРЯНИН Виталий Степанович

УДК 662.61

ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ГОРЕНИЕ - СПОСОБ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Специальность 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

САРАТОВ - 1987

Работа выполнена на кафедре теплотехники и электротехники  
Брестского инженерно-строительного института

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Г.П.Алаев
- доктор технических наук, профессор Г.Н.Деягин
- доктор технических наук, профессор В.М.Седелкин

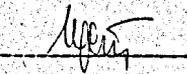
Ведущее предприятие -  
институт тепломасообмена им.А.В.Дыкова АН БССР

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1987г.  
в "\_\_\_" час. на заседании специализированного совета  
Д.063.58.02 при Саратовском политехническом институте  
по адресу: 410016 Саратов, ул. Политехническая, 77 ауд. "\_\_\_".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Саратовского политехнического института.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1987г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор технических наук  
профессор

  
\_\_\_\_\_  
Д.М. Хлебалин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. "Научно-технический прогресс должен быть нацелен на радикальное улучшение использования природных ресурсов, сырья, материалов, топлива и энергии", - сказано в новой редакции Программы КПСС, принятой на XXII съезде. В народном хозяйстве применяется огромное количество топливоиспользующих установок, предназначенных для сжигания топлив и передачи полученного при этом тепла соответствующим объектам. Необходимо снижать капитальные затраты при изготовлении огнетехнических установок (габариты, масса, стоимость), уменьшать текущие затраты на производство и использование тепловой энергии (повышать к.п.д., снижать расходы энергии на собственные нужды), а так же снижать загрязнение окружающей среды продуктами горения. Имеющиеся способы улучшения технико-экономических показателей теплотехнического оборудования почти исчерпаны. В таких отраслях как энергетика в основном используются крупные, максимально экономичные агрегаты, и даже относительно небольшое улучшение параметров дает значительный экономический эффект. В строительстве, сельском хозяйстве и т.п. зачастую используются настолько несовершенные теплотехнические аппараты, потребляющие большое количество топлива, что задача усовершенствования этого оборудования малозатратными средствами становится особенно актуальной. Применительно к огневому теплотехническому оборудованию настоящее исследование решает эту проблему при помощи организации особого режима горения - так называемого пульсирующего горения.

Цель и основные задачи. Целью настоящей работы является разработка теоретических основ использования пульсирующего горения, экспериментальное изучение основных закономерностей явления и

создание высокоэффективного теплотехнического оборудования на базе улучшения показателей процессов сжигания топлива и теплообмена.

Для достижения поставленной цели решены задачи: а) изучены выгорание топлива, интенсификация теплообмена, наддув, снижение затрат на собственные нужды, особенности потоков, генерируемых устройствами пульсирующего горения; б) определено воздействие пульсирующего потока продуктов сгорания на теплообменники для улучшения эксплуатационных свойств поверхностей нагрева с точки зрения их загрязнения, аэродинамического сопротивления, теплонпряженности; в) уточнено влияние устройств пульсирующего горения на окружающую среду - как с положительной стороны (отсутствие недожога, уменьшение выбросов окислов азота), так и с отрицательной (шумоглушение); г) проведены конструкторские проработки теплотехнических устройств с пульсирующим горением.

Предмет защиты. В соответствии с поставленной целью предметом защиты являются следующие научно-технические разработки.

1. Особенности поведения и горения топлива в пульсирующем газовом потоке. Теплотехнические особенности пульсирующего факела. Достоинства аппаратов с пульсирующим горением.

2. Слоевое пульсирующее горение, принцип, характеристики процесса, конструктивное оформление.

3. Анализ устойчивости течения в пульсационных нагревателях. Уточнение критерия Раля. Комбинация в одном агрегате пульсационной топки и теплообменника.

4. Теплообмен на поверхностях нагрева внутри устройств пульсирующего горения. Интенсификация теплообмена потоком продуктов сгорания.

5. Анализ работы клапанных систем устройств пульсирующего горения.

6. Газодинамические достоинства пульсирующего горения. Целесообразность наддува огневых теплообменников устройствами пульсирующего горения. Конструктивные преимущества.

7. Экспериментальные исследования поведения нестационарной струи в поверхности нагрева. Исследование удалений загрязнений. Конструкции устройств акустической очистки.

8. Конструкции агрегатов с пульсирующим горением (теплогенераторы, котлы, сушилки, машины строительной технологии), их доводка, испытание, внедрение.

9. Шумоглушение при пульсирующем горении.

Научная новизна. Исследования позволили установить следующие неизвестные ранее факты.

1. Математическое моделирование поведения частицы в пульсирующем потоке показало интенсивное её обдувание, что является основной причиной высоких форсировок камер горения.

2. Установкой в топочном объеме устройства пульсирующего горения тепловоспринимающих поверхностей нагрева можно совместить в одном агрегате высокофорсированные процессы горения и теплообмена. При этом устойчивость пульсационного режима повышается, т.к. максимум теплоотода попадает в фазу разрежения.

3. Определенное расположение в резонирующем канале слоя горючего кускового топлива реализует новое явление - слоевое пульсирующее горение.

4. Устройства пульсирующего горения целесообразно использовать одновременно как теплогенератор и как источник механической энергии. При этом вследствие исключения тягодутьевых машин с электроприводом наддув устройствами пульсирующего горения предпочтительней обычных схем огневого нагрева.

5. Высокая интенсивность конвективного теплообмена внутри устройства пульсирующего горения обусловлена, кроме пульсационной интенсификации, так же высокими значениями среднерасходных скоростей, которые достигаются не за счет тягодутьевых машин, а благодаря работе клапанных систем и колебательным режимом течения газов, на что расходуется часть энергии продуктов сгорания.

6. Достоинства аппаратов с пульсирующим горением заключается, кроме известного снижения габаритов и масс за счет интенсификации горения и теплообмена, в гибкости компоновочных решений, в снижении температурного уровня факела, в коагуляции и удалении взвешенной фазы, в уменьшении эмиссии окислов азота.

7. Распространение нестационарной струи в объеме, загроможденном аналогом поверхности нагрева, сопровождается индуцированием вторичных течений, способствующих очистке и теплообмену. Нестационарная струя своим действием охватывает почти весь конвективный пучок, в отличие от стационарной. Акустическая очистка обладает свойством как струйного, так и волнового воздействия на объекты.

8. Использование эжекционных свойств устройства пульсирующего горения позволяет установить шумоглушитель на воздушном тракте без снижения тепловой мощности установки при соосной установке клапана и резонансной трубы.

#### Практическая ценность.

1. Исследования показали, что организация пульсационного течения газообразных продуктов сгорания является малозатратным и в то же время высокоэффективным способом интенсификации теплотехнических процессов. Это позволяет снизить объемы теплотехнического пространства на порядок, величину поверхностей нагрева на 20...25%, расход энергии на дутье свести к минимуму, поверхности нагрева

поддерживать в эксплуатационно чистом состоянии, упростить регулирование топочного процесса.

2. Анализ автоколебаний подтвердил возможность вьода псверхностей нагрева непосредственно в факел устройства пульсирующего горения, что позволяет повысить компактность и снизить температуру продуктов сгорания без снижения эффективности сжигания.

3. На основании экспериментальных исследований разработаны рекомендации по ведению режимов горения, при этом для дожигания частиц топлива необходимы максимальные акустические смещения, а для воспламенения - наоборот, необходимо наличие узла давления стоячей волны. Исследования выгорания топлива привели к разработке конструкций ряда устройств пульсирующего горения. Предложенные зависимости позволяют определять основные режимные и конструктивные параметры устройств.

4. Так как устройства акустической очистки на базе пульсирующего горения имеют двойное действие на отложения - струйное и волновое, то в качестве профилактического средства необходимы импульсные камеры с максимальным давлением срабатывания, а в качестве очистителя конкретного объекта - с максимальным объемом. Поэтому на крупных энергетических котлоагрегатах используются релаксационные импульсные камеры, а установки малой мощности представляют собой крупномасштабные камеры пульсирующего горения.

5. Разработаны и успешно опробованы конструкции на базе устройств пульсирующего горения: водоподогреватели и парогенераторы, воздухоподогреватели (теплогенераторы), устройства акустической очистки поверхностей нагрева, сушилки для инертного материала, термические разжижители битума, устройства для термической обработки труб газопроводов, устройства для термического обезвреживания отходов. Эти установки подтвердили возможность достижения вы-

соких технико-экономических показателей благодаря применению пульсирующего горения.

6. Разработанная система шумоглушения позволила снизить воздействие на обслуживающий персонал основного недостатка пульсирующего горения - низкочастотного шума. Интенсивность звука снижена со 120...130 дБ до 86...107 дБ. При необходимости дальнейшего снижения - обычными средствами.

Реализация результатов работы в промышленности. Устройства акустической очистки на базе камер пульсирующего горения используются на промышленных предприятиях различных отраслей (Змиевская ГРЭС, Рудненская ТЭЦ, Ворошиловградская ГРЭС, Челябинская ТЭЦ-1, Новочеркасская ГРЭС, ТЭЦ-22 Мосэнерго, Новотроицкий завод хромовых соединений, Стерлитамакская ТЭЦ, Славянская ГРЭС и др.). Термический разжижитель битума внедрен в организациях треста Запжирремстроймонтаж, Средазжирремстроймонтаж, Уралчерметремонт, Брестского облремстройтреста и т.д. Документация по устройству разослана более чем в 300 адресов. Воздухоподогреватель (теплогенератор) явился базой разработки Брестским ГСКБ Минжизмаша СССР вентиляционного агрегата. Водогрейный котел модульной конструкции опробован в Минских тепловых сетях. Установка для термической обработки труб строящегося газопровода прошла в 1983 г. трассовые испытания на одном из участков газопровода Уренгой-Ужгород, а установка для термического обезвреживания отходов - на Брестском электромеханическом заводе и Вяземском заводе графитовых изделий. Разжижитель битума на ВДНХ СССР отмечен бронзовой медалью, экспонировался на выставках в Венгрии и Югославии. По результатам Всесоюзного конкурса по экономии тепловой и электрической энергии разработки по акустической очистке награждены дипломом. Общий экономический эффект только по представленным документам

составил более 717 тыс.рублей.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и об-суждены на I и II Международных симпозиумах по пульсирующему горе-нию в 1971г. и в 1982г. (Шеффилд, Англия и Атланта, США); на IV, V, VI Международных симпозиумах процессов горения в ПНР (в 1975, 1977, 1979гг.); на Международной школе-семинаре по проблемам тепло-и массообмена в процессах горения, используемых в энергетике (Минск, 1980г.); на 4-х всесоюзных конференциях по пульсирующему горению (1965, 1966, 1972, 1974гг. - Москва, Казань, Челябинск, Свер-дловск); на Всесоюзных межвузовских конференциях по газотурбинным и комбинированным установкам (МВТУ им.Баумана, 1979г. и 1983г.); на Всесоюзных семинарах по сжиганию топлив с минимальными выбро-сами (Таллин, 1974, 1976гг.); на 12-ти научно-технических конфе-ренциях Брестского инженерно-строительного института (1973-1985 гг.); на межзаводской школе Министерства химической промышлен-ности СССР, Светлогорск, 1977г.; на Всесоюзной научной конференции "Проблемы энергетики теплотехнологии" (Москва, 1983г.).

Объем работы. Диссертационная работа содержит 261 страницу машинописного текста, 73 рисунка, библиографию из 209 названий, приложение из 48 графиков, 22 актов внедрения, 2 примеров расчета экономического эффекта. Структурно диссертация состоит из введе-ния, четырех глав по изучению современного состояния вопроса, те-оретическим и экспериментальным исследованиям процессов горения, тепло-массообмена, газодинамики и по созданию образцов новой тех-ники с пульсирующим горением, выводов. Эта структура обоснована необходимостью представления пульсирующего горения как способа ин-тенсификации теплотехнических процессов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Нестационарность процесса горения известна давно (Рэлей Л., 1878г.; Рейнст Ф.Х., 1929г.; Вуйтицкий С.А., 1960г.; Раушенбах Б.В., 1961г.; Солоухин Р.И., 1970г.; Патнам А.А., 1971г.; Михальцев В.Е., 1972г.; Попов В.А., 1972г.; Подьмов В.Н., 1973г.; Торопов Е.В., 1974г.), однако мало целенаправленных исследований её для полезного использования в теплотехнических установках (Швидт П., 1941г.; Рейнст Ф.Х., 1950г., Кацнельсон В.Д., 1960; Хубер Л., 1971; Браун Д., 1971г.; Кинк А.А., 1979г.; Щелоков Я.М., 1980г.). Отсутствуют данные по режимным и конструктивным особенностям установок пульсирующего горения, по их взаимодействию с обслуживаемыми объектами. Мало изучены вопросы поведения и горения топлива в пульсирующей среде, энергетические соотношения и газодинамические возможности пульсирующих потоков, теплообмен внутри устройств пульсирующего горения, распространение нестационарной струи в поверхностях нагрева. Вопросы шумоглушения при пульсирующем горении не имеют литературной проработки.

Сущность и особенности явления. Согласно Раушенбаху Б.В., точное устройство в виде камеры сгорания с объемом  $V$ , к которому присоединен канал длиной  $l$  с поперечным сечением  $F$ , имеет такое меняющееся во времени  $\tau$  сопротивление  $\delta P$ :

$$\frac{d^2}{d\tau^2} \delta P + (K - S \frac{\alpha P}{V}) \frac{d}{d\tau} \delta P + \left( \frac{F}{\rho l} \frac{\alpha P}{V} - K S \frac{\alpha P}{V} \right) \delta P = 0 \quad (1)$$

(здесь  $\alpha$  - показатель адиабаты,  $K$  - коэффициент аэродинамического сопротивления,  $S$  - связь между давлением и скоростью горения,  $\rho$  - плотность газа). Решение этого уравнения, когда корни характеристического уравнения будут комплексными величинами,

$$\delta P = C_1 \exp \nu_1 \tau \cos \omega \tau + C_2 \exp \nu_2 \tau \sin \omega \tau, \quad (2)$$

т.е., как доказано Раушенбахом В.В., при определенных соотношениях параметров (физических, режимных, геометрических) система может войти в автоколебательный режим течения газовой среды.

В диссертации показано, что при пульсирующем горении, как в любом автоколебательном процессе, должны быть промежутки времени с отрицательным сопротивлением. Для рассматриваемого случая это означает, что рост (или уменьшение) скорости потока  $V$  сопровождается уменьшением (возрастанием) сопротивления  $\delta P$  движению этого потока:  $d(\delta P)/dV < 0$ .

Газовый тракт устройства имеет аэродинамическое  $\xi V \rho^2/2$  и тепловое  $(T_2/T_1 - 1) V^2 \rho^2/2$  сопротивление потоку, обусловленное ускорением нагревающегося газа. При наличии теплообмена  $dT_2/dV < 0$ , поэтому

$$\frac{d(\delta P)}{dV} = \frac{1}{T_1} \frac{dT_2}{dV} \frac{V^2}{2} \rho^2 + \left[ \xi + \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right] \left( V \rho + \frac{V^2}{2} \frac{d\rho}{dV} \right) < 0, \quad (3)$$

т.е. абсолютная величина первого слагаемого производной (3) больше величины второго.

Выражение (3) при достаточно большом абсолютном значении первого слагаемого описывает случай "мягкого" возбуждения пульсационного режима (вход в режим при наличии малого акустического или аэродинамического возбуждающего импульса). Если же первое слагаемое (3) мало, то правая часть должна быть отрицательной. Это - случай "жесткого" возбуждения пульсационного режима, когда требуется импульс определенной величины. Значение этого уровня обусловлено по (3) так:  $-d\rho/dV > 2\rho/V$ , что реализуется в промежутках времени при обратном движении газа,  $V < 0$ , ибо всегда

$$\xi + (T_2/T_1 - 1) > 0, \text{ т.к. обычно коэффициент сопротивления}$$

$\xi > 1$ . Таким образом, даже для  $\xi > 1$  газового тракта возможны колебания, а наличие теплоотвода расширяет диапазон существования автоколебаний.

Существенным отличием пульсирующего горения от сгорания в стационарном факеле является осязаемое снижение температуры горения. Вероятно, этому способствует несколько факторов, но важнейшим является снижение энтальпии газа, расходуемой на повышение кинетической энергии движения потока.

Кинетическая энергия элементарной массы потока

$$dE = \frac{V^2}{2} dm = \frac{1}{2} V^2 \rho dV = \frac{1}{2} V^3 \rho F d\tau, \quad (4)$$

(  $\rho$  - плотность газа,  $V$  - объем газа, прошедший со скоростью  $V$  поперечное сечение  $F$  камеры за время  $\tau$  ).

Для выхлопа камеры, где расположен узел давления стоячей волны,  $P \approx const$ ,  $\rho \approx const$ , поэтому за время  $T$  для стационарного потока

$$E_{cm} = \frac{1}{2} \rho F \int V^3 d\tau = \frac{1}{2} \rho F T V_{cp}^3, \quad (5)$$

то же для пульсирующего потока

$$E_n = \frac{1}{2} \rho F \int_0^{2\pi} V^3 d\tau = \frac{1}{2} \rho F T V_{cp}^3 + \frac{3}{4} \rho F T V_{cp} V_a^2. \quad (6)$$

Таким образом, для ускорения знакопеременного пульсирующего потока газов требуется больше энергии, чем для ускорения стационарного потока, на величину

$$\Delta E = \frac{3}{4} \rho F T V_{cp} V_a^2, \quad (7)$$

при этом относительное снижение энтальпии по этой причине

$$\varepsilon = \frac{E_n - E_{cm}}{E_{cm}} = \frac{3}{2} \left( \frac{V_a}{V_{cp}} \right)^2. \quad (8)$$

Обычно  $V_{cp} = 100 \dots 200$  м/с,  $V_a = 20 \dots 100$  м/с, поэтому

$\varepsilon = 0,08 \dots 0,1$ , т.е. снижение температуры может быть порядка 10%, т.е. примерно  $100 \dots 150^\circ\text{C}$ , что и наблюдается в эксперименте. Эта особенность пульсирующего горения чрезвычайно важна с технической точки зрения (повышение надежности работы материала топочной камеры).

Важным свойством пульсирующего горения является снижение концентрации окислов азота в продуктах сгорания. Известно, что наибольшее влияние на выход окислов азота оказывает температура, которая значительно ниже, чем в стационарном факеле. Время пребывания газов в зоне горения устройств пульсирующего горения, т.е. в зоне максимальных температур, намного меньше, чем при стационарном горении, что объясняется повышением среднерасходной скорости течения. Кроме того, минимальные избытки воздуха в устройствах пульсирующего горения, сильная турбулизация потока приводят к очень малому парциальному давлению кислорода в зоне горения. Все эти факторы снижают содержание окислов азота в продуктах сгорания. Эксперименты дают величину  $NO_x = 20 \dots 80 \text{ мг/м}^3$  (в аналогичных устройствах стационарного горения  $NO_x = 200 \dots 400 \text{ мг/м}^3$ ).

В любой трубе могут происходить свободные колебания газового столба, соответствующие резонансу по собственным частотам. Если в момент сжатия нагревать газ, то газовая система способна производить работу расширения, по аналогии с прямым циклом тепловой машины. В момент расширения (снижения давления) подвод тепла к газу должен быть минимальным. Этот общий энергетический принцип применим как для описанного выше факельного пульсирующего горения, так и для полученного другого аналогичного явления - слоевого пульсирующего горения.

Если в вертикальной трубе на  $1/4$  снизу установить слой горящего топлива, то при автоколебаниях воздух, проходя вверх через

слой, приобретает тепло и почти не подогревается при обратном движении. Акустическое смещение максимально по торцам трубы, поэтому эффект переменного теплоподвода максимален в этих местах, однако он должен реализоваться в фазе сжатия, т.е. зону горения необходимо размещать между пучностями давления и скорости, как раз в указанном месте трубы. Этот режим слоевого пульсирующего горения представляет собой знакопеременное обдувание воздухом и топливом газом частиц топлива в слое.

### ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

В высокотемпературной диффузионной области реагирования огромную роль играет аэродинамическая обстановка вокруг горячей частицы топлива. Для анализа обдувания необходимо знать движение потока и частицы. Ниже рассматривается закрученный пульсирующий поток с заданной среднерасходной и пульсационной скоростью и частотой пульсаций, как наиболее общий, из которого можно получить одномерный поток, а также из-за того, что наиболее употребительным процессом в исследованиях и применении был пульсационный в сочетании с циклонным. Распределение тангенциальных и радиальных составляющих скоростей газа по радиусу принималось в виде  $V_{\tau, r} \cdot r^k = \text{const}$ ; показатель степени  $k$  делит вихрь на две зоны: квазипотенциальную, где  $k = 2(r - r') / (r_0 - r')$  для  $r' < r < r_0$ , и квазитвердую, где  $k = -1$  для  $0 < r < r'$ .

Линии тока можно описать радиусом-вектором  $r$ , повернутым на угол  $\varphi$  за время  $\tau$ :

$$\begin{cases} r = r_0 \exp \left[ \pm (V_{o\tau}^{cp} + V_{\tau}^a \sin \omega \tau) \left( \frac{r_0}{r} \right)^k \frac{tg \frac{V_{\tau}}{V_r}}{r} \cdot \tau \right] \\ \varphi = (V_{o\tau}^{cp} + V_{\tau}^a \sin \omega \tau) \frac{1}{r} \cdot \tau \end{cases} \quad (9)$$

Исходной зависимостью для описания движения частицы топлива принималось уравнение движения тела переменной массы (формула Мещерского). На частицу действуют силы: давление потока, кориолисова, центробежная.

Изменение массы частицы во времени с учетом её выгорания выражается так:

$$\frac{dm}{dt} = -\pi \delta (2 + 0,16 \left[ \frac{|\dot{x}| \delta}{\nu} \right]^{2/3}) C_{O_2} \rho_g \mathcal{D} / (M \beta), \quad (10)$$

где  $Nu_{\mathcal{D}} = 2 + 0,16 Re^{2/3}$ ,  $\delta$  - размер частицы,  $\nu$  - вязкость газа,  $C_{O_2}$  - концентрация  $O_2$ ,  $\mathcal{D}$  - коэффициент диффузии,  $\rho_g, \rho_p$  - плотности газа и частицы,  $M$  - стехиометрическое отношение,  $\beta$  - стехиометрический коэффициент,  $\dot{x}$  - скорость обдувания (разность скоростей газа и частицы),  $\dot{x} = V - W$ .

Математической моделью процесса является система следующих уравнений: 1) тангенциальное ускорение частицы

$$\frac{dW_T}{dt} = \frac{A}{\delta^2} \left[ (V_{\sigma}^{cp} + V_T^a \sin \omega \tau) \left( \frac{r_0}{r} \right)^k - W_T \right] \pm \pm 2 (V_{\sigma}^{cp} + V_T^a \sin \omega \tau) \left( \frac{r_0}{r} \right)^k \frac{1}{r} \dot{x}_T + (2 + 0,16 \left[ \frac{|\dot{x}| \delta}{\nu} \right]^{2/3}) W_T \frac{B}{\delta^2}; \quad (11)$$

2) радиальное ускорение частицы

$$\frac{dW_p}{dt} = \frac{A}{\delta^2} \left[ (V_{\sigma}^{cp} + V_T^a \sin \omega \tau) \left( \frac{r_0}{r} \right)^k - W_p \right] \pm \pm 2 (V_{\sigma}^{cp} + V_T^a \sin \omega \tau) \left( \frac{r_0}{r} \right)^k \frac{1}{r} \dot{x}_T + (2 + 0,16 \left[ \frac{|\dot{x}| \delta}{\nu} \right]^{2/3}) W_p \frac{B}{\delta^2} - \frac{W_T^2}{r}; \quad (12)$$

3) уменьшение размера частицы при её выгорании

$$\dot{\delta} = \sqrt{\delta_0^2 - \frac{2}{3} (2 + 0,16 \left[ \frac{|\dot{x}| \delta}{\nu} \right]^{2/3}) B \tau}; \quad (13)$$

4) скорость обдувания частицы

$$|\dot{x}| = \sqrt{\dot{x}_T^2 + \dot{x}_p^2} =$$

$$= \sqrt{\left[ \left( V_{\tau}^{cp} + V_{\tau}^a \sin \omega \tau \right) \left( \frac{r_0}{r} \right)^k - W_{\tau} \right]^2 + \left[ \left( V_{\rho}^{cp} + V_{\rho}^a \sin \omega \tau \right) \left( \frac{r_0}{r} \right)^k - W_{\rho} \right]^2}; \quad (14)$$

5) радиальная скорость частицы

$$W_{\rho} = \pm dr/d\tau; \quad (15)$$

6) скорость вращения радиус-вектора

$$d\varphi/d\tau = W_{\tau} / r; \quad (16)$$

7) осевая скорость частицы

$$W_z \approx V_z. \quad (17)$$

В этих уравнениях  $A = \frac{3}{4} c Re \partial \rho_r / \rho_n$ ;  $B = 6 \rho_r C_2 D / (M \beta \rho_n)$ ; при  $r > r_0$  - течение дивергентное, при  $r < r_0$  - конвергентное; индексы:  $\tau$  - тангенциальная,  $\rho$  - радиальная,  $cp$  - среднерасходная,  $a$  - амплитудная,  $0$  - начальная скорость. При угловой частоте пульсаций  $\omega = 0$  система (II)...(I7) дает течение в стационарном потоке; при  $B = 0$  - частица постоянной массы;  $\delta = 0$  - течение газового потока; при  $V_{\rho} = 0$ ;  $B = 0$ ;  $k = 0$  имеем одномерное движение частицы постоянной массы. Система (II)...(I7) дифференциальных уравнений I порядка решена на ЭВМ методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага с заданными начальными значениями. На рис. I в качестве примера показаны: а) траектории движения частиц в закруженном пульсирующем потоке; б) изменение во времени размера и скорости обдувания частицы с начальным диаметром  $10^{-3}$  м в конвергентном потоке; в) то же для начального диаметра частицы  $10^{-5}$  м в дивергентном потоке; кривые 1,2,3,4,9 - внешний радиус  $r_0$  камеры 0,2 м; кривые 5,6,7,8 - начальный радиус  $r_0$  раскручивающегося вихря 0,04 м; кривые 1,5 - пульсации отсутствуют; 2,6,8 - частоты пульсаций 50 герц; 3,7 - 500 герц. Кривые 4,8 - частица постоянной массы. Линии 9 - фототреки реального процесса, снятые

по условию равенства величины  $A/\delta^2$  в эксперименте и расчете. Численный эксперимент приведен для частиц трех диаметров, трех начальных размеров вихря, трех частот пульсаций, двух значений амплитуд пульсаций тангенциальных и радиальных составляющих скоростей потока.

Математическое моделирование приводит к выводам: относительная скорость газ-частица при пульсациях потока в несколько раз больше, чем в стационарном вихре, в одномерном потоке разница увеличивается; влияние в уравнениях движения слагаемого, учитывающего изменение массы частицы, невелико (т.к. размер частицы резко изменяется только в конце выгорания) и составляет 3...12% относительно других слагаемых, поэтому основные закономерности обдувания можно проследить на одномерном движении частицы постоянной массы.

В этом случае решение дифуравнения движения частицы в пульсирующем потоке приводит к такому выражению для относительной скорости обдувания:

$$\tilde{z} = [\sin x + A_1 \cos x - A_1 \exp(-A_1 x)] / (1 + A_1^2), \quad (18)$$

здесь  $\tilde{z} = (v-w)/v_a$ ;  $x = 2\pi t/T$ ;  $A_1 = x \rho_r T v / (\rho_p \delta^2)$ , ( $T$  - период колебаний).

Эффективная скорость обдувания частицы пульсирующим потоком

$$\tilde{z}_{\text{эфф}} = 0,5 v_0 T / (\lambda \tau) + \tilde{z} v_a / \sqrt{2}, \quad (19)$$

здесь  $\lambda$  - коэффициент ослабления начальной скорости

$$\lambda = [v_0 - (v_{cp})_n] / (n v_0), \quad (20)$$

( $v_0$  - сумма начальной скорости частицы и средней скорости потока,  $(v_{cp})_n$  - постоянная составляющая скорости частицы в "н"-ном

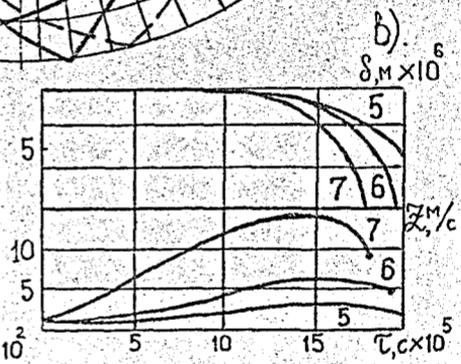
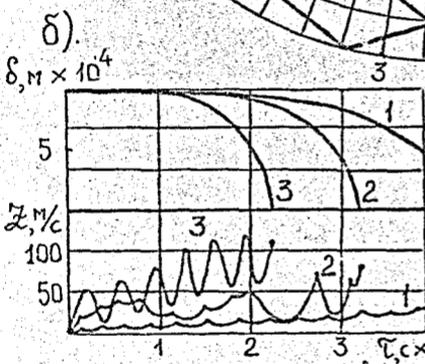
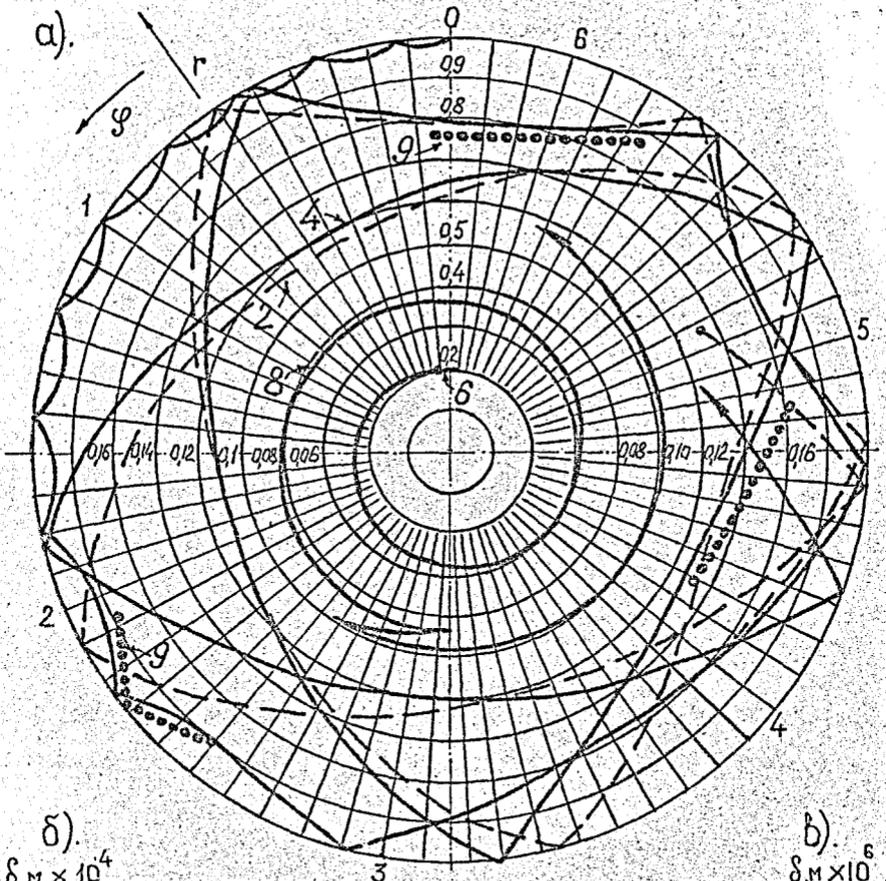


Рис. 1. Трассы, выгорание и обдувание частиц

периоде колебаний). Для процесса большой длительности первым слагаемым в (19) можно пренебречь.

Расчеты показывают, что даже для мелких угольных частиц (20...100 мкм) обдувание их пульсирующим потоком ( $f = 20...100$  гц,  $t = 1000...1300$  К) весьма ощутимо ( $\xi = 0,7...0,8$ ), в то время как обдувание тех же частиц стационарным потоком с той же средней скоростью пренебрежимо.

Экспериментальные данные по выгоранию угольных частиц в пульсирующем потоке обобщены критериальным уравнением

$$\lg[K_s \delta / (c_2 \omega)] = 0,5 [\lg Pe + \exp(-5,5 \lg Pe) - 1], \quad (21)$$

где  $Pe$  - диффузионный критерий Пекле,  $Pe = \xi_{\text{ггг}} \delta / \omega$ ,  $K_s$  - поверхностная скорость горения.

Сопоставление расчета горения по (21) с экспериментальными данными по факельным пылеугольным камерам пульсирующего горения подтверждает предположение о том, что интенсивное обдувание частицы топлива - основная причина ускорения процесса реагирования при пульсирующем горении, высокого уровня тепловыделения, равного (1...50) МВт/м<sup>3</sup>.

Аналогичные данные по интенсификации получены и для слоевого пульсирующего горения. Так, если при обычном слоевом режиме горения напряжение зеркала горения составляло (0,9...1) МВт/м<sup>2</sup>, то ввод топочного устройства в пульсационный режим, при тех же условиях, без привлечения вспомогательного воздушного дутья, повышает этот параметр до (1,2...2,0) МВт/м<sup>2</sup>.

#### ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Имеется достаточно много данных по интенсификации теплообмена в пульсирующем потоке, которые обобщаются зависимостью, при-

мерно одинаковой во многих работах (Хэнби В. и Браун ; Еухман С. В., Накоряков В.Е., Таракановский А.А., Забродский С.С. и др.):

$$Nu_n / Nu = A + B Pr^k (Re_n / Re)^n, \quad (22)$$

(индекс "n" - для пульсирующего потока).

Особый интерес представляет влияние самого теплообменника на устойчивость пульсационного режима в устройстве пульсирующего горения. Как известно, критерий Рэлея характеризует ввод в пульсационный режим при переменном теплоподводе, т.е. фазовые соотношения при горении:

$$0 < |\varphi| < \pi/2. \quad (23)$$

В выражении (23)  $\varphi$  - фазовый угол между переменным давлением и переменным теплоподводом.

Если поместить в устройство пульсирующего горения конвективный теплообменник, то температура газа возле теплообменной поверхности

$$T = T_{cp} + T_a \sin(\omega\tau + \varphi'), \quad (24)$$

где  $\varphi'$  - фазовый сдвиг между скоростью и температурой как следствие тепловой инерции. Поэтому разность фаз между колебаниями температуры (а следовательно, теплоъемом) и давлением будет

$$\psi = \varphi' + \pi/2. \quad (25)$$

Если максимум теплоотвода за счет  $\psi$  попадает в фазу разрежения, то система должна входить в автоколебательный режим. Поэтому для устройства пульсирующего горения с помещенными в него поверхностями нагрева правило Рэлея следует добавить условием

$$\pi/2 < |\psi| < 3\pi/2. \quad (26)$$

При соблюдении (23) и (26) возможно создание в одном агрегате высокофорсированных топлики и теплообменника, при этом автоколе-

бательные режимы в них поддерживают друг друга.

Для исследования теплообмена внутри устройства пульсирующего горения была разработана специальная методика, по которой коэффициент теплоотдачи определялся так:

$$\alpha = L |\lg \mathcal{U}| / \tau_k, \quad (27)$$

(здесь  $L$  - характеристика внесенного в поток образца - масса, теплоемкость и др.,  $\mathcal{U}$  - отношение температурных напоров в начале и конце опыта,  $\tau_k$  - время достижения конечной температуры образца; этот момент визуализировался различными способами).

Теплоотдача к цилиндру (аналог трубы) в устройстве пульсирующего горения характеризуется зависимостью

$$Nu = 0,7 Re^{0,5} Pr^{0,4} \mathcal{E}_\varphi, \quad (28)$$

здесь  $\mathcal{E}_\varphi$  - коэффициент, учитывающий направление потока. Коэффициент теплоотдачи в исследованных устройствах на 40...50% выше, чем в аналогичных при стационарном горении, однако в первом случае отсутствует дутьевое устройство, во втором - требуются большие энергозатраты на дутье.

Щелевой теплообменник, состыкованный с устройством пульсирующего горения, имеет следующие зависимости для теплообмена в ламинарной и турбулентной области течения газов соответственно:

$$Nu = 0,4 Re^{0,5} Pr^{0,4}; Nu = 0,028 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (29)$$

На примере сушки песка был исследован массообмен в пульсирующем потоке сушильного агента, выдаваемого устройством пульсирующего горения. Получена следующая зависимость между конечной влажностью песка  $\mathcal{E}$ , расходом сырого песка  $G_1$ , количеством испаренной влаги  $G_2$ , скоростью вращения барабана сушки  $\Omega$ , углом наклона барабана  $\beta$ :

$$\xi = 0,01 G_1 [0,22 \ln n - 0,15 \ln(0,01 G_2)] - 0,06 G_2 t g \beta + 1,9. \quad (30)$$

В обычных сушилках интенсивность испарения составляет 50...150 кг/м<sup>3</sup>ч; в сушилке такой же конструкции, но с устройством пульсирующего горения, 300...400 кг/(м<sup>3</sup> ч).

#### НАДУВ УСТРОЙСТВАМИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Устройство пульсирующего горения в принципе является "газовым насосом", в котором тепловая энергия непосредственно переходит в кинетическую энергию движущегося потока. Этот переход реализуется благодаря периодичности рабочих процессов и особой геометрии газового тракта устройства. Исследований по аэродинамическим особенностям работы устройств пульсирующего горения не известно. В данной работе изучен вопрос использования пульсирующего горения с точки зрения снижения расхода энергии на тягу и дутье.

Обычно имеется в виду, что коэффициент аэродинамического сопротивления тракта в прямом направлении  $\zeta_{пр}$  ниже, чем тот же параметр для обратного потока  $\zeta_{обр}$ . Вентильный эффект - отношение количества среды, пропущенной трактом в прямом направлении, к количеству среды, прошедшей за такое же время в обратном направлении при пульсирующем режиме течения,

$$k = G_{пр} / G_{обр} = \frac{\int_{\tau_{сн}^k} f(v) d\tau}{\int_{\tau_{сн}^k} f(v) d\tau}, \quad (31)$$

(здесь  $\tau_{сн}^k, \tau_{сн}^o$  - момент конца и начала впуска,  
 $\tau_{снп}^k, \tau_{снп}^o$  - тоже для выпуска среды из клапана).

Для изотермического течения потока его среднерасходная  $V_{ср}$  и амплитуда переменной скорости  $V_a$  свяжутся так:

$$V_{cp} = V_a (\sqrt{\epsilon_{\sigma p}} - \sqrt{\epsilon_{np}}) / (\sqrt{\epsilon_{\sigma p}} + \sqrt{\epsilon_{np}}). \quad (32)$$

При наличии внешнего наддува к правой части (32) следует добавить  $V_g$ . Обозначив  $V_{cp}/V_a = R$ , имеем для вентильного эффекта:

$$h = 1 + \pi R (\sqrt{1+R^2} - R \arccos R)^{-1}. \quad (33)$$

Если  $\rho_{\sigma p}^{cp} < \rho_{np}^{cp}$ , то  $h$  увеличивается. При  $h > 1$  реализуются "насосные" качества пульсирующего горения.

Если в обычной газотурбинной установке камеру сгорания заменить устройством пульсирующего горения, то можно отказаться от компрессора. Термодинамический анализ такого цикла показывает, что, как и для цикла Ленуара, его КПД равен

$$\eta_t^{nr} = 1 - k (\lambda^{1/k} - 1) (\lambda - 1)^{-1}, \quad (34)$$

$k$  - показатель адиабаты,  $\lambda$  - повышение давления в устройстве.

Устройство пульсирующего горения весьма целесообразно использовать в цикле, аналогичном теплофикационному (комбинированная выработка механической и тепловой энергии). Примером может служить разработанная установка для подогрева воздуха. Даже при малом  $\eta_t^{nr}$  было вполне достаточно механической энергии для подачи нагретого воздуха потребителю.

Сопоставление огневого нагревателя, обслуживаемого устройством пульсирующего горения, с нагревателем, имеющим камеру сгорания и вентилятор с электроприводом, приводит к следующему соотношению расходов топлива при одинаковых мощностях и прочих параметрах нагревателей:

$$B_1/B_2 = [(1 - \eta_t^{nr}) (1 + \eta_t^{nr}/\eta_0)]^{-1}. \quad (35)$$

Здесь  $B_1$  и  $B_2$  - расходы топлива на нагрев теплоносителя и его перемещение при пульсирующем и стационарном горении,  $\eta_t^{nr}$  - КПД перехода тепла в кинетическую энергию по (34),  $\eta_o$  - общий КПД, равный произведению КПД теплотростанции, электропередачи, привода, вентилятора и т.д. При реальных значениях  $\eta_t^{nr}$  и  $\eta_o$  имеем  $B_1 < B_2$ , что доказывает целесообразность использования пульсационных нагревателей.

Важным параметром, определяющим способность устройств к наддуву, является амплитуда  $\delta P$  колебания давления газа. В работе получено следующее удобное для инженерных расчетов выражение максимального значения этого параметра

$$\delta P = 0,25 Q_n^p B / (Vf), \quad (36)$$

( $V$  - объем камеры,  $f$  - частота пульсаций).

#### АКУСТИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Так как устройство пульсирующего горения воздействует на загрязнения в основном через генерируемую её нестационарную струю газов, которая образует вокруг себя звуковое поле, этот способ очистки был назван акустическим (последующие исследователи называют его импульсным, ударным, ударно-акустическим и т.д.). Для исследования обдувания трубного пучка нестационарной струей (в особенности импульсной) был создан специальный прибор, измеряющий тангенциальные скорости потока у поверхности труб. Зная векторы скоростей у поверхности труб, можно построить поле скоростей в пространстве между трубами. Измерялось также звуковое поле в объеме трубного пучка специальным сферическим датчиком.

Изучение нестационарной струи в трубном пучке показало:

- при подаче в пучок взрывного импульса все трубы пучка имеют зафиксированное омывание газовым потоком. При подаче стационарной

струи смывается незначительная доля труб ;

- при импульсном обдувании характерны не только транзитный проход струи около некоторых труб пучка, но и циркуляция вокруг труб, а так же наличие вихрей между трубами, т.е. движение среды в межтрубном пространстве обусловлено не только расширением выхлопной струи и волновым смещением, но и вторичными течениями газа ;

- центром излучения волны является не выхлопной срез генератора нестационарной струи, а некоторое место внутри трубного пучка, на расстоянии нескольких калибров выхлопного отверстия устройства пульсирующего горения ;

- внедрение нестационарной струи в загроможденный объем на порядок глубже, шире, интенсивней, чем стационарной струи.

Далее было изучено удаление отложений с труб в трубном пучке и с плоскости в специальных экспериментальных установках. Степень очистки служила величина  $\beta = (\Delta B / B) \cdot 100\%$ , где  $B$  - вес отложений на трубах до срабатывания устройства,  $\Delta B$  - вес удаленного с труб материала (песок, летучая зола, корунд и т.д.). Генератором нестационарной струи, как и в предыдущих опытах, служила ударная воздушная труба и горшечной пульсатор с вентилятором. Опыты показали, что трубный пучок менее чувствителен к изменению мощности импульса, чем плоскость ; место ввода струи в пучок почти не влияет на величину " $\beta$ ".

Лабораторные исследования приводят к выводам:

1. Аппараты акустической очистки в виде устройств пульсирующего горения имеют двойное действие на внешние загрязнения поверхностей нагрева - струйное (параболическая зависимость между степенью очистки и скоростью истечения) и волновое (более глубокое проникновение в пучок нестационарной струи, чем стационарной).

2. В качестве профилактического очистителя как трубных пучков, так и трубчатых экранов желательно устройство с большой амплитудой

давления и малой емкостью накопителя газов, т.е. имеющее в основном волновое действие. Место и направление ввода импульса в объект очистки при этом не играет существенной роли.

3. Для очистки наиболее загрязняющихся элементов котельного оборудования (фестон, горячая по ходу газов часть пароперегревателя, топочные экраны у горелок, на аэродинамических выступах и т.д.) необходимы устройства с превалированием струйного эффекта (большая емкость камеры, суживающиеся насадки, введение в струю воды и т.д.); место их установки обусловлено геометрией загрязнения.

4. Устройства пульсирующего горения для акустической очистки могут сочетаться в одном блоке с другими видами очистки (вибрационной, термоциклической, дробевой, химической).

#### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Устройства пульсирующего горения следует подразделить на два основных вида: гармонические камеры пульсирующего горения (синусоидальный режим колебаний) и импульсные камеры (релаксационные колебания); в описываемых ниже установках они являются источником высокотемпературного теплоносителя, а также пульсаций давления и скорости в нем.

Расчет основных конструктивных и режимных параметров велся на основе изложенного выше теоретического и экспериментального материала.

Термический разжижитель битума. Конструктивно аппарат представляет собой (см. рис. 2) емкость I с обогреваемыми стенками, внутри которой расположен теплообменник в виде газоходов 2, которые соединены через коллектор с устройством пульсирующего горения 3. Топливо в него подается форсункой 4, воздух автоматически засасывается через аэродинамический клапан 5, продукты сгорания, пройдя резонансную трубу 6, поступают в газоходы 2, затем в обогреваемые стенки

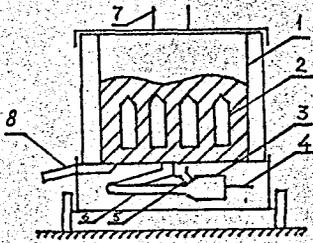


Рис.2. Разжижитель битума

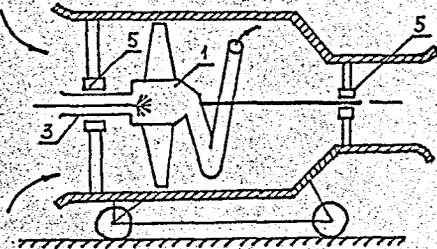


Рис. 3. Смесительный теплогенератор

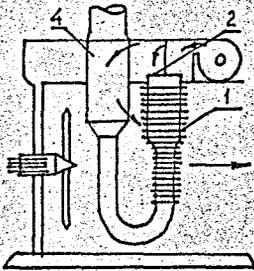


Рис.4. Вентиляционный теплогенератор

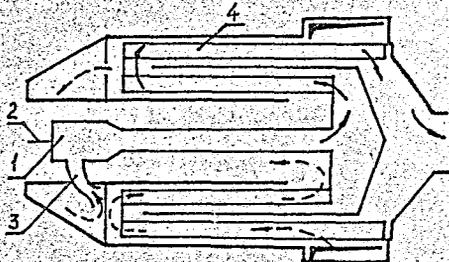


Рис.5. Высокотемпературный теплогенератор

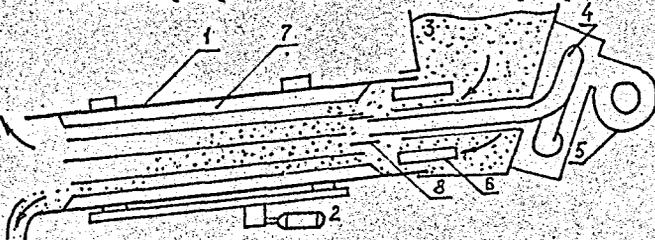


Рис.6. Сушилка

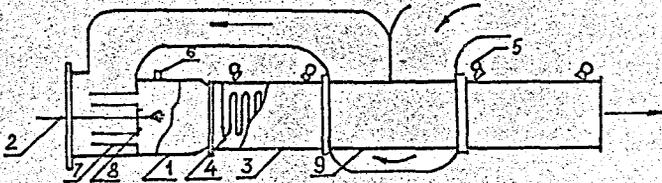


Рис.7. Парогенератор

емкости I и выбрасываются наружу трубой 7.Кусковой битум загружается в емкость I сверху,разжиженный - удаляется течкой 8.

Техническая характеристика установки:

Тепловая мощность . . . . .	160...200 кВт
Топливо: тип . . . . .	соляр,керосин,газ
давление . . . . .	0,1...1,0 МПа
расход . . . . .	8 ...15 кг/ч
Акустические параметры:	
частота . . . . .	50...125 гц
амплитуда давления . . . . .	0,002...0,005МПа
сила звука . . . . .	90 дб
Температура:	
в камере сгорания . . . . .	1900 К
уходящие газы . . . . .	480 К
разогретый битум . . . . .	450 К
Производительность по битуму:	
при периодической загрузке . . . . .	0,5...0,7 т/ч
при непрерывной работе . . . . .	0,7...1,0 т/ч
Поверхность нагрева . . . . .	6,2 м <sup>2</sup>
Емкость по битуму . . . . .	0,51 м <sup>3</sup>
Габариты . . . . .	1,1x1,0x0,9 м
Масса сухой установки . . . . .	240 кг

Производительность установки выше обычных на 100...300%, отсутствует загрязнение атмосферы (содержание окислов азота 70 мг/м<sup>3</sup>, полное отсутствие сажи), КПД достигает 90%, расход энергии на собственные нужды минимальный (электроэнергия расходуется только на топливный насос).

Теплогенератор (огневой калорифер). На рис.3 показан теплогенератор смесительного типа (смешение подогреваемого воздуха с продуктами сгорания), на рис.4 - теплогенератор для вентиляционных схем (малое сопротивление по воздуху), на рис.5 - высокотемпературный теплогенератор с развитой поверхностью нагрева. В этих теплогенераторах: 1 - устройство пульсирующего горения с форсункой 2 и аэродинамическим клапаном 3; 4 - поверхности нагрева; 5 - подшипники.

Основные параметры теплогенераторов

Расход топлива . . . . .	7...20 кг/ч
вид топлива . . . . .	соляр, керосин, газ
расход нагреваемого воздуха . . . . .	$(3...5) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$
нагрев воздуха на . . . . .	40...400 К
Температура уходящих газов . . . . .	310...390 К
КПД . . . . .	79...96%
содержание $NO_x$ в выбросах . . . . .	35...74 мг/м <sup>3</sup>
уровень шума . . . . .	86...103 дБ
масса машины . . . . .	150...320 кг

Эти теплогенераторы, таким образом, имеют лучшие технико-экономические показатели, чем существующие.

Сушильное устройство. В промышленных условиях была испытана барабанная сушилка (рис.6), состоящая из вращающегося барабана 1 при помощи электропривода 2, бункера сырья 3, устройства пульсирующего горения 4 с вентилятором 5 для охлаждения устройства и регулирования скорости газов в 1. Барабан 1 захватами 6 выгребает песок из бункера сырья 3, далее материал пересыпается на полках 7. На песок действует нестационарная струя из насадка 8.

Технические характеристики сушилки:

производительность по песку . . . . .	2 т/ч
исходная влажность песка . . . . .	15...20%
влажность продукта . . . . .	0,5%
расход топлива (соляр) . . . . .	5...15 кг/ч
температура уходящих газов . . . . .	390...420 К
скорость вращения барабана . . . . .	4 об/мин
потребляемая мощность . . . . .	4,5 кВт
размеры барабана, диаметр, длина . . . . .	0,4x2,2 м

Напряженность сушилки по испаренной влаге в 2-3 раза превышает этот параметр для аналогичных сушилок с обычными горелочными устройствами; производительность выше в тех же соотношениях.

Парогенератор. Установка (рис.7) состоит из камеры воспламенения I (диаметр 0,25 м, длина 0,3м) и конвективных блоков 3, соединенных друг с другом фланцами. Сечение блоков 3 - 0,2x0,2 м, в них расположены поверхности нагрева из стальных труб диаметром 10 мм в виде змеевиков 4. Концы змеевиков выводятся наружу и объединяются коллекторами 5. В одном блоке длиной 0,5 м набрана поверхность 1,3 м<sup>2</sup>. Сечение блоков квадратное. На камере воспламенения расположена форсунка 2, клапан 7, запальник 6, газификатор 8. Воздухоподогреватель 9 в данной конструкции целевой, двухходовой по воздуху. Изготовлен из стальных пластин толщиной 2 мм, шириной 0,2 м, длиной 0,5 м. К воздухоподогревателю воздух подводится коробом 10. Парогенератор имеет следующие основные технические данные:

паропроизводительность . . . . .	до 2,5 т/ч
расход топлива (отработанное турбинное масло) 30...150 кг/ч	
напор воздуха от вентилятора . . . . .	до 2000 Па
частота пульсаций . . . . .	40...60 гц
амплитуда давления . . . . .	8000...23000 Па
температура газов:	
в камере воспламенения . . . . .	1600-1700 К
на выходе . . . . .	340-390 К
температура воздуха:	
холодного . . . . .	280...290 К
после воздухоподогревателя . . . . .	до 470 К
КПД . . . . .	92%
средний коэффициент теплопередачи . . . . .	300...400 Вт/(м <sup>2</sup> ч)

Был отработан так же парогенератор с естественной циркуляцией.

Водогрейный котел. Агрегат представляет собой крупномасштабную камеру пульсирующего горения (рис.8), имеющую форсунку 1, аэродинамические клапаны 2, пусковой запальник 3. Особенность конструкции - камера воспламенения выполнена в виде водяного коллектора 4 и выпускного коллектора 5; эти коллекторы соединены друг с другом трубчатыми змеевиками 6. Поверхность нагрева закрыта кожухом 7.

Выхлоп выполнен в виде расширяющегося газохода, в котором размещаются гибы труб. Конструкция имеет минимум сварных стыков.

Результаты испытаний котла:

расход топлива (соляр) . . . . .	20...50 кг/ч
расход воды . . . . .	до 4400 кг/ч
нагрев воды . . . . .	на 60...80 К
• КПД . . . . .	около 90%
температура уходящих газов . . . . .	330...400 К
тепловая мощность . . . . .	300...500 кВт
общая поверхность нагрева . . . . .	10 м <sup>2</sup>

Котел может располагаться в любом положении, работать под наддувом, подсоединяться к любому газоходу, являться модулем блочной установки. Длительная эксплуатация экспериментальной установки подтвердила достоинства конструкции, показала надежность отдельных узлов, высокую эффективность сжигания топлива. Металлоемкость этого котла на порядок ниже, чем водогрейного котла той же мощности со стационарным горением. Важно так же отметить низкий средний уровень температур газов по тракту котла при полном отсутствии недожогов в уходящих газах. Габариты котла: 2,5x0,6x0,6 м; сухая масса - 300 кг. Котел опробован так же при работе на мазуте и газе.

Устройство акустической очистки. На рис. 9 представлена схема установки акустической очистки поверхностей нагрева мощных энергетических котлоагрегатов. Устройство представляет собой емкость I в виде труб, соединенной выхлопами с газоходами пароперегревателей. В эту емкость трубопроводом 2 подается газозоудная смесь, которая воспламеняется запальником по определенной программе, по сигналу от блока автоматического управления 5. Блок регулирует подачу газа и воздуха в смеситель 3 и включает электросвечу. Таким образом, устройство представляет собой релаксационную камеру пульсирующего горения с вынужденной частотой колебаний. Кроме этой схемы, разработаны и автоколебательные релаксационные устройства.

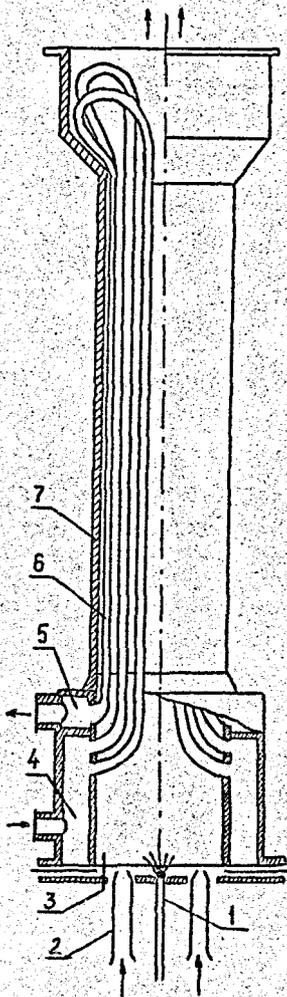


Рис. 8. Водогрейный котел

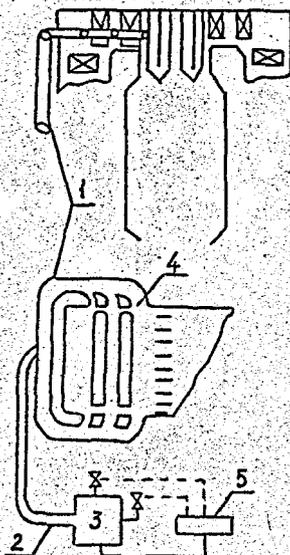


Рис. 9. Установка акустической очистки

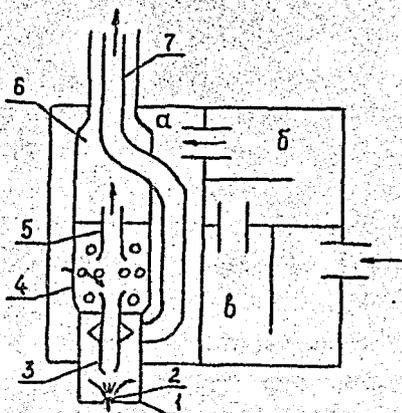


Рис. 10. Вариант шумоглушения

Режим работы устройства по рис.9:

расход газа . . . . .	до 100 м <sup>3</sup> /ч
частота пульсаций . . . . .	0,1...0,02 гц
амплитуда давления . . . . .	0,2...0,7 МПа
время включения . . . . .	10...30 мин
количество включений в смену . . . . .	1

При регулярном включении устройства поверхности нагрева поддерживаются в эксплуатационночистом виде длительное время.

Разработан и опробован ряд других теплотехнических установок с пульсирующим горением (устройство для обезвреживания отходов, для термообработки труб газопроводов, расплители, льдоуборочная машина и др.).

ШУМОГЛУШЕНИЕ

Единственным существенным недостатком пульсирующего горения является излучение шума из зоны горения. Исследование показало, что вибрации не только не опасны для каких-либо элементов устройства пульсирующего горения или вспомогательного оборудования и строительных конструкций, но даже в большинстве случаев не превышают санитарно-допустимых норм. В настоящее время шум является основным барьером широкого использования пульсирующего горения в народном хозяйстве. Очень важно, чтобы затраты на мероприятия, связанные с шумоглушением при пульсирующем горении, не свели на-нет все достоинства метода.

Звуковое поле вокруг работающей открытой установки пульсирующего горения характеризуется высоким уровнем звукового давления (на выхлопе 110...120 дБ) при низких частотах (50...120 гц), что объясняет трудности шумоглушения.

Если устройство пульсирующего горения работает на объект, обладающий шумогасящими свойствами (котельный пучок, поток сыпучего

материала, сложные газоходы), то подавление шума на выходе не представляет затруднений. Сложнее с шумоглушением по воздушному тракту устройства, со стороны воздушных аэродинамических или механических клапанов. Если имеется воздушный вентилятор достаточной мощности, то также сравнительно просто подобрать глушитель, т.к. его аэродинамическое сопротивление будет преодолено вентилятором. Однако очень важно не терять одного из главных достоинств устройства пульсирующего горения - возможности работы без внешнего наддува. В этом случае задача подавления шума, излучаемого воздушными клапанами, весьма сложна, особенно для аэродинамического клапана, самого простого и дешевого.

Анализ работы аэродинамического клапана показал, что при определенных условиях может иметь место устойчивый поток газов (смесь выхлопа и воздуха) наружу из клапана (поток, создающий шум); именно поэтому по оси клапана звуковое давление максимально. При совмещении потока из клапана с основным выхлопом они могут взаимно экранировать друг друга, таким образом улучшая вентиляцию камеры воспламенения. В этом случае организация эжекции эквивалентна установке вентилятора. Тогда на воздушной стороне устройства можно установить соответствующий глушитель. На основании предварительных опытов и расчетов была разработана и внедрена на термических разжигателях битума конструкция глушителя, изображенного на рис.10.

Устройство пульсирующего горения, состоящее из камеры воспламенения 1, форсунки 2, аэродинамического клапана 3, снабжено перфорированной трубой 4, в которой располагается патрубок 5. При работе устройства в зазоре между 3 и 5 из-за высоких скоростей создается разрежение, поэтому в полость 4 засасывается воздух, который преодолевает сопротивление секций а,б, в обычного глушителя. Выхлоп из резонансной трубы 7 эжектирует среду из полости б,

улучшая снабжение воздухом устройства. Использование описанной конструкции позволило снизить уровень звукового давления со 120 дБ до 90...100 дБ. Разработаны и другие схемы шумоглушения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пульсирующее горение является высокофорсированным методом использования топлив, благодаря которому интенсифицируются многие теплотехнические процессы. Практическое применение метода ограничивалось недостаточно развитыми исследованиями по целенаправленному применению явления.

Результаты настоящей работы сводятся к следующему.

1. Выявлены основные зависимости при факельном пульсирующем горении. Показана важность правильных фазовых соотношений. Обобщен опыт эксплуатации экспериментальных устройств пульсирующего горения.

2. Предложен ряд конструкций устройств пульсирующего горения различного назначения. Разработаны новые методы и приборы для исследований пульсирующего горения.

3. Описано новое явление - слоевое пульсирующее горение, выявлены факторы, влияющие на устойчивость режима, получены основные соотношения. Предложены конкретные конструкции для использования слоевого пульсирующего горения. Показано, что слоевое пульсирующее горение увеличивает тепловую мощность процесса в полтора-два раза без привлечения добавочных энергетических средств.

4. Исследовано поведение частицы топлива в пульсирующем газовом потоке. Показано, что следует учитывать два режима обдувания частицы газом - обволакивание частицы продуктами сгорания и полный срыв их с поверхности. Расчет на основе теоретических и экспериментальных исследований выгорания топлива в реальных устройствах пульсирующего горения доказывает, что увеличение скорости обдувания

является основным фактором интенсификации горения.

5. Доказано, что введение в тракт устройства пульсирующего горения поверхностей нагрева с целью отвода тепла способствует устойчивости автоколебаний в газовом потоке. Правило Рэлея в случае теплообмена дополняется новым условием попадания максимума теплоотвода в минимум давления. Поэтому в одном агрегате возможно сочетание двух высокофорсированных пульсационных процессов - горения и теплообмена.

6. Проведено исследование теплообмена внутри тракта устройства пульсирующего горения, получены высокие значения коэффициентов конвективной теплоотдачи на уровне 200...400 Вт/(м<sup>2</sup> К). Чем меньше среднерасходная скорость, тем выше степень интенсификации конвективного теплообмена. Изучение обезвоживания песка показало существенную интенсификацию сушки материала в продуктах сгорания устройств пульсирующего горения; процесс интенсифицируется в два-три раза по сравнению с использованием стационарного сушильного потока.

7. Проанализирована работа клапанных систем устройств пульсирующего горения, рассмотрены их конструкции. Вентильный эффект клапана характеризуется как конструктивным параметром, так и показателем наддува. Правильное проектирование и изготовление клапанов позволяет снизить вплоть до нуля расход энергии на подачу воздуха для горения.

8. Устройство пульсирующего горения становится генератором высокоскоростной газовой струи без каких-либо добавочных дутьевых механизмов. Кинетическую энергию потока газов можно использовать для привода вспомогательных механизмов. Хотя КПД преобразования невелик, этой энергии вполне достаточно, например, для подачи потребителю нагретого в устройстве воздуха.

9. Наддув огневых теплообменников устройствами пульсирующего горения дает экономию по топливу по сравнению с теплообменниками, имеющими обычные камеры сгорания и вентиляторы с электроприводом, т.к. часть тепла, выделяющегося при горении, переходит в механическую работу непосредственно в установке пульсирующего горения.

10. Исследовано очищающее воздействие устройств пульсирующего горения на поверхности нагрева. Изучено поведение нестационарной струи в трубном пучке. Показано, что обдувание труб в этом случае обусловлено не только прямым ударом потока, но и возбуждением вторичных течений, а так же акустическим смещением газовой среды. Этим объясняется высокая эффективность так называемой акустической очистки. Метод характеризуется двойным воздействием на загрязнения - струйным и волновым, поэтому при разработке обдувочных устройств на базе камер пульсирующего горения релаксационного типа следует учитывать их назначение - профилактика загрязнений (использовать волновой эффект) или удаление образовавшихся (акцент на струйное действие) загрязнений.

11. Особое внимание в работе уделено вопросу шумоглушения. Показано, что шум, как существенный недостаток устройств пульсирующего горения, снижается до приемлемого уровня сравнительно малозатратными методами. Наиболее целесообразно функцию глушителя и утилизатора тепла соединять в одном объекте. Более сложная задача глушения шума по воздушному тракту решается конструкторскими приемами.

12. Исследование механизма пульсации, физики горения, теплообмена и аэродинамики при пульсирующем горении позволили создать ряд промышленных конструкций агрегатов с пульсирующим горением: термические разжижители битума для строительного-дорожных работ; теплогенераторы-воздухонагреватели огневого типа для систем воз-

душного отопления; парогенераторы малой мощности для автономных энергоустановок; сушильные устройства для инертных материалов; водогрейные котлы модульной конструкции для систем отопления и различных технологий; устройства акустической очистки на базе импульсных релаксационных камер пульсирующего горения для поверхностей нагрева котлоагрегатов большой мощности.

Эти конструкции опробованы в промышленных условиях с вышеуказанным экономическим эффектом. Предлагаются другие направления использования пульсирующего горения в народном хозяйстве.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях (монография, статьи, изобретения, доклады):

1. Подьмов В.Н., Северянин В.С., Щелоков Я.М. Прикладные исследования вибрационного горения. Изд. Казанского университета, Казань, 1978, 218 с.
2. Северянин В.С. О сжигании твердого топлива в пульсирующем потоке. Теплоэнергетика, 1969, № 2, с.12-16.
3. Северянин В.С. О перспективах пульсирующего горения в энергетике. Труды I Международного симпозиума по пульсирующему горению. Шеффилдский университет, Шеффилд, Англия, 1971. - Доклад № 13, с.1-12.
4. Северянин В.С., Лысков В.Я., Шилин Н. Акустическая очистка поверхностей нагрева котлоагрегатов. Сб. Минеральная часть топлива и её роль в работе энергетических устройств. Изд-во Минэнерго СССР, Алма-Ата, 1971, с.20-23.
5. Северянин В.С., Лысков В.Я., Резвых Н.И., Окулов А.Д., Рябцев Ф.И., Солонуха П.В. Акустическая очистка поверхностей нагрева котлов-утилизаторов. - Промышленная энергетика, 1971, №12, с.27-29.
6. Северянин В.С., Ушаков С.Г. О скорости обдувания твердой частицы в пульсирующем потоке газа. Инженерно-физический журнал, № 1, т. XXII, 1972, с.166-167.
7. Щелоков Я.М., Лысков В.Я., Северянин В.С., Шилин А.Н. Об оценке эффективности очистных устройств поверхностей нагрева. - Промышленная энергетика, 1972, № 7, с.40-43.

9. Северянин В.С., Ушаков С.Г. О механизме горения частиц топлива в пульсирующем потоке. - В кн.: Пульсирующее (вибрационное) горение. Тез. докл. к У научно-технической конференции. Челябинск, НТОЗ и ЭП, УралВТИ, 1972, с.8-10.
10. Северянин В.С., Попов А.Г., Лысков В.Я., Шилин А.Н. О создании парогенератора с пульсирующим горением. - Там же, с.38-40.
11. Северянин В.С., Лысков В.Я., Шилин А.Н. О механизме акустической очистки. - Там же, с.40-42.
12. Лысков В.Я., Брунов В.Н., Северянин В.С., Шилин А.Н. Использование камер пульсирующего горения в химических аппаратах. - Там же, с.66-68.
13. Северянин В.С., Гасников В.И., Дмитриев В.И., Щелоков Я.М., Лысков В.Я., Шилин А.Н., Рыжовский Н.С., Кляев А.В. Использование нестационарного горения для очистки поверхностей нагрева - Промышленная энергетика, 1973, № II, с.37-39.
14. Северянин В.С., Лысков В.Я., Шилин А.Н. Высокофорсированный парогенератор. - Промышленная энергетика, 1973, № II, с.27-29.
15. Северянин В.С. Пульсирующее горение - высокофорсированный тепловой процесс. - Сб. научных трудов. Межвузовский выпуск, №3. Изд. МВССО РСФСР, Магнитогорский горно-металлургический ин-т, 1973, с.93-104.
16. Северянин В.С., Шилин А.Н., Лысков В.Я., Новицкас А.А. Улучшение способа очистки котлов от золовых отложений. - Энергетика, 1973, № 12, с.18-19.
17. Северянин В.С. Особенности горения частицы твердого топлива в пульсирующем потоке. - Сб.: Горение твердого топлива. Новосибирск: Наука, 1974, с.35-40.
18. Северянин В.С. О термическом обезвреживании отходов устройствами пульсирующего горения. - Сб.: Сжигание топлив с минимальными выбросами. Изд. АН ЭССР, Таллин, 1974, с.113-116.
19. Северянин В.С. О коагуляции частиц в звуковом поле. - Сб.: Сжигание с минимальными вредными выбросами. Изд. АН ЭССР, Таллин, 1974, с.121-125.
20. Северянин В.С. Экспериментальное изучение распространения нестационарной газовой струи в трубном пучке. - Изв. вузов СССР - Энергетика, 1974, № II, с.147-150.
21. Северянин В.С., Лысков В.Я., Шилин А.Н. Исследование, разработка и внедрение аппаратов нестационарного горения для очистки поверхностей нагрева. - Теплоэнергетика, 1974, №1, с.12-16.

22. Северянин В.С. О нагревателях с пульсирующим горением. - Изв. вузов СССР - Энергетика, 1974, № 5, с.142-146.
23. Северянин В.С. Горение частицы топлива в пульсирующем потоке. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1975, № 6, с.144-146.
24. Северянин В.С., Кинк А.А., Мере Х.А. К использованию устройств пульсирующего горения для очистки газа. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1975, № 11, с.131-134.
25. Северянин В.С., Лысков В.Я., Шилин А.Н. Акустическая очистка воздухоподогревателей котлоагрегатов. - Промышленная энергетика, 1975, № 7, с.50-52.
26. Северянин В.С. Лабораторные исследования акустической очистки. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1976, № 5, с.71-75.
27. Лысков В.Я., Северянин В.С., Зыринов В.П., Сергиенко И.А., Шилин А.Н. Волновая очистка поверхностей нагрева котельных агрегатов от наружных загрязнений. - Труды Всесоюз.теплотехн. НИИ, Уральский филиал, 1976, вып.12, с.30-32.
28. Лысков В.Я., Шилин А.Н., Северянин В.С. Стендовые исследования вслнвой очистки поверхностей нагрева. - Труды ВТ НИИ, Уральский филиал, 1976, вып.12, с.26-29.
29. Северянин В.С., Дерещук Е.М. О перспективах использования пульсирующего горения. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1977, № 5, с.138-143.
30. Северянин В.С. Об измерении теплоотдачи в газовых потоках. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1978, № 1, с.141-143.
31. Северянин В.С., Дерещук Е.М. Новое устройство для нагревания высоковязких материалов. - Информ.листок № 084-1978, БелНИИТИ, Минск, 1978. - 5 с.
32. Северянин В.С. Об определении амплитуд переменного давления газа в устройствах пульсирующего горения. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1978, № 5, с.130-132.
33. Северянин В.С. Особенности аэродинамики камер пульсирующего горения. - Сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Высшая школа, 1978, № 5, с.25-29.
34. Северянин В.С., Дерещук Е.М., Врублевский Э.М. Термический разжижитель битума с пульсирующим горением. Сб.: Эксплуатация, ремонт и защита от коррозии оборудования в химической промышленности. Изд. НИИТЭХИМ, 1978, № 5, с.3-5.
35. Северянин В.С. Энергетические особенности камер пульсирующего

- горения. - В кн.: Газотурбинные и комбинированные установки. Тезисы докл. Всесоюзной Межвузовской научной конференции/МВТУ им.Баумана. М., 1979, с.171-172.
36. Северянин В.С. Об использовании слоевого пульсирующего горения. Сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, № 7. - Минск, Вышэйшая школа, 1980, с.73-76.
37. Северянин В.С., Верба М.И. Конвективный теплообмен в устройствах пульсирующего горения. Сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, № 7. - Минск, Вышэйшая школа, 1980, с.58-62.
38. Северянин В.С. Пульсирующее горение твердого топлива. Сб.: Проблемы тепло- и массопереноса в процессах горения, используемых в энергетике. Изд. АН БССР, Минск, 1980, с.47-57.
39. Горбачева М.Г., Северянин В.С. Пульсирующее горение - средство снижения окислов азота в дымовых газах. Сб. научных трудов Ростовского инженерно-строительного института. Ростов, 1980, с.107-109.
40. Северянин В.С., Афонин В.Г., Верба М.И., Горбачева М.Г. О применении пульсирующего горения для сушки песка. - Изв. вузов СССР - Энергетика, 1981, № 4, с.112-114.
41. Северянин В.С., Верба М.И. Теплогенератор с пульсирующим горением. - В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск, Вышэйшая школа, 1981, № 8, с.92-96.
42. Северянин В.С. О фазовых соотношениях при пульсирующем горении. - Изв. вузов СССР - Энергетика, 1981, № 10, с.110-112.
43. Северянин В.С., Афонин В.Г., Дерезук Е.М. К выбору оптимальных параметров нагревательной установки специального вида. - Изв. вузов СССР - Энергетика, 1982, № 1, с.118-120.
44. Северянин В.С., Горбачева М.Г. Об эмиссии окислов азота при пульсирующем горении. - В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск, Вышэйшая школа, 1982, № 9, с.122-127.
45. Северянин В.С. Применение пульсирующего горения в промышленных установках. - В кн.: Труды II Международного симпозиума по пульсирующему горению. - США, Атланта, Институт исследования газа, 1982, доклад № 7, с.1-21.
46. Северянин В.С., Яскевич Б.Н. Оценка амплитуды давлений при пульсирующем горении. - Изв. вузов СССР - Энергетика, 1983, № 2, с.69-90.
47. Северянин В.С. Пульсирующее горение топлив - способ интенсификации теплотехнических процессов. - В кн.: Проблемы энерге-

- тики теплотехнологии. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции/ Моск.энергетич. ин-т. - М., 1983, с.55.
48. Северянин В.С. О целесообразности наддува устройствами пульсирующего горения. - В кн.: Газотурбинные и комбинированные установки. Тезисы докл. Всесоюзной Межвузовской научной конференции/ МВТУ им.Баумана. - М., 1983, с.164.
  49. Северянин В.С. Водогрейный котел с пульсирующим горением. - Промышленная энергетика, 1983, № II, с.46-47.
  50. Северянин В.С. Наддув устройствами пульсирующего горения. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1983, № II, с.70-74.
  51. Северянин В.С., Смоленский В.Г., Кацевич В.К., Качинова Л.В. Экспериментальное исследование пульсационной горелки для сжигания дизельного топлива. - Изв.вузов СССР - Энергетика, 1984, № 5, с.105-108.
  52. Северянин В.С. О целесообразности интенсификации теплообмена устройствами пульсирующего горения. - В кн.: Проблемы тепло- и массообмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива. Часть 2. Материалы международной школы-семинара/ ИТМО АН БССР им.Лыкова. - Минск, 1984, с.90-97.
  53. Северянин В.С., Субботкин Л.Д., Анисимов С.Н. Экономическая оценка обезвреживания отходов морского бурения. - Промышленная энергетика, 1985, № 8, с.57-59.
  54. Северянин В.С., Дерезук Е.М. Интенсификация теплопроводности устройствами пульсирующего горения. - В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетике. - Минск, Высшая школа, 1983, № 10, с.92-94.
  55. Дерезук Е.М., Северянин В.С. Форсированный разогрев тугоплавких битумов с использованием пульсирующего горения. - В кн.: Процессы переноса в структурирующихся жидкостях/ ИТМО АН БССР им.Лыкова. - Минск, Высшая школа, с.147-148. (1985)
  56. А.с. № 200695 (СССР) Устройство для сжигания топлива в пульсирующем потоке/ Северянин В.С. - Оpubл. в Б.И., 1968, № 27.
  57. А.с. № 222580 (СССР) Устройство для сжигания топлива в пульсирующем потоке/ Северянин В.С., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1968, № 23.
  58. А.с. № 228216 (СССР) Камерная топка/ Северянин В.С., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1968, № 31.
  59. А.с. № 235893 (СССР) Устройство для сжигания топлива в пульсирующем потоке/ Северянин В.С., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1969, № 6.

60. А.с. № 237324 (СССР) Устройство для сжигания топлива в пульсирующем потоке / Северянин В.С., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1969, № 8.
61. А.с. № 251742 (СССР) Устройство для сжигания топлива / Северянин В.С., Лысков В.Я., Хидиятов А. - Оpubл. в Б.И., 1969, № 28.
62. А.с. № 314976 (СССР) Устройство для отбора газа, содержащего пыль, вредные примеси, и выброса его в атмосферу / Северянин В.С., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1971, № 28.
63. А.с. № 328318 (СССР) Устройство для очистки поверхностей нагрева / Северянин В.С., Гарбуз А.Н., Лысков В.Я., Шилин А.Н. - Оpubл. в Б.И., 1972, № 6.
64. А.с. № 348821 (СССР) Камера пульсирующего горения / Северянин В.С., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1972, № 25.
65. А.с. № 357416 (СССР) Устройство для сжигания топлив в пульсирующем потоке / Северянин В.С., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1972, № 33.
66. А.с. № 360534 (СССР) Устройство для очистки поверхностей нагрева / Северянин В.С., Шилин А.Н., Лысков В.Я., Скляров В.Ф., Шушилов В.А. - Оpubл. в Б.И., 1972, № 36.
67. А.с. № 362981 (СССР) Способ очистки наружных поверхностей / Северянин В.С., Пешехонов Н.Д., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1973, № 3.
68. А.с. № 421360 (СССР) Устройство для размола и подсушки материала / Северянин В.С., Лысков В.Я., Пешехонов Г.Д. - Оpubл. в Б.И., 1974, № 12.
69. А.с. № 433841 (СССР) Шахтная печь / Северянин В.С., Лысков В.Я., Либин А.Л. - Оpubл. в Б.И., 1974, № 23.
70. А.с. № 492723 (СССР) Устройство для очистки поверхностей нагрева / Северянин В.С., Лысков В.Я., Шилин А.Н. - Оpubл. в Б.И., 1975, № 43.
71. А.с. № 536276 (СССР) Устройство для разогрева битумного материала / Северянин В.С., Верба М.И., Дерещук Е.М. - Оpubл. в Б.И., 1976, № 43.
72. А.с. № 556282 (СССР) Устройство для воспламенения топлива / Малышев Г.Н., Северянин В.С., Шилин А.Н., Лысков В.Я. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 16.
73. А.с. № 570758 (СССР) Устройство для подогрева воздуха / Северянин В.С., Байдук Н.И., Самосюк Ю.В. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 32.

74. А.с. № 578524 (СССР) Установка для обезвреживания отходов / Северянин В.С., Северянина Л.П., Митин Б.А. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 40.
75. А.с. № 580400 (СССР) Парогенератор / Северянин В.С., Лысков В.Я., Шилин А.Н. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 42.
76. А.с. № 611103 (СССР) Распределитель газовых потоков / Северянин В.С., Барбышев В.М., Чикишев В.А. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 22.
77. А.с. № 628210 (СССР) Устройство для разогрева битумного материала / Северянин В.С., Дерещук Е.М., Богачук Д.М., Врублевский Э.М. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 38.
78. А.с. № 654723 (СССР) Устройство для разогрева битума / Северянин В.С., Дерещук Е.М. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 12.
79. А.с. № 668995 (СССР) Установка для разогрева битума / Дерещук Е.М., Северянин В.С. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 23.
80. А.с. № 687313 (СССР) Устройство для пульсирующего сжигания топлива / Северянин В.С. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 35.
81. А.с. № 688763 (СССР) Парогенератор / Северянин В.С., Северянина Л.П., Порт В.В., Сергеенко А.П., Добкин С.М. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 36.
82. А.с. № 705243 (СССР) Способ очистки поверхностей нагрева котлоагрегатов, работающих на высокосернистых мазутах / Лысков В.Я., Северянин В.С., Шилин А.Н., Кацман В.И. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 47.
83. А.с. № 715688 (СССР) Устройство для разогрева битумного материала / Северянин В.С., Дерещук Е.М., Богачук Д.Ф., Наливайко И.Н. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 6.
84. А.с. № 751885 (СССР) Устройство для разогрева битума / Дерещук Е.М., Северянин В.С. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 28.
85. А.с. № 721652 (СССР) Газопроводящий канал сушилки / Северянин В.С., Северянина Л.П., Тенетко Л.А. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 10.
86. А.с. № 759804 (СССР) Воздухонагреватель / Северянин В.С., Сергеенко А.П., Добкин С.С. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 32.
87. А.с. № 826137 (СССР) Устройство для пульсирующего сжигания топлива / Северянин В.С., Добкин С.М., Телегин Э.М., Вакуленко А.В. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 16.
88. А.с. № 832091 (СССР) Выхлопное устройство / Северянин В.С. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 19.

89. А.с. № 848935 (СССР) Устройство для тепловой обработки сыпучих материалов / Северянин В.С., Верба М.И., Врублевский Э.В., Горбачева М.Г., Дерешук Е.М., Ранский В.А. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 27.
90. А.с. № 850989 (СССР) Установка для термического обезвреживания отходов животноводческих комплексов / Митин Б.А., Северянин В.С., Субботкин Л.Д. - Оpubл. в Б.И., 1981, - 28.
91. А.с. № 870854 (СССР) Устройство для пульсирующего сжигания топлива / Северянин В.С. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 37.
92. А.с. № 879145 (СССР) Способ запуска камеры пульсирующего горения / Добкин С.М., Северянин В.С., Телегин Э.М., Вакуленко А.В., Падучев А.М., Ельшов В.Д., Красулин В.В., Полухин А.А. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 41.
93. А.с. № 879147 (СССР) Устройство пульсирующего горения / Северянин В.С., Телегин Э.М. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 41.
94. А.с. № 909422 (СССР) Камера пульсирующего горения / Северянин В.С., Наливайко И.Н. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 8.
95. А.с. № 909478 (СССР) Воздухонагреватель / Добкин С.М., Телегин Э.М., Вакуленко А.В., Северянин В.С., Климович Д.В., Полухин А.А., Лариошин В.В. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 8.
96. А.с. № 918734 (СССР) Распылительная сушилка / Кучко Т.В., Северянин В.С., Кабалкин Г.С., Иванистов А.Н. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 13.
97. А.с. № 966398 (СССР) Парогенератор / Северянин В.С., Наливайко И.Н., Борчук Н.И., Телегин Э.М., Добкин С.М., Вакуленко А.В. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 38.
98. А.с. № 1025963 (СССР) Устройство пульсирующего горения / Северянин В.С. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 24.
99. А.с. № 1179027 (СССР) Установка для термической обработки жидких отходов / Фальковский В.Г., Северянин В.Г., Васин Н.В., Митин Б.А., Урецкий Е.А. - Оpubл. в Б.И., 1985, № 34.
100. А.с. № 1203332 (СССР) Установка для термической обработки отходов / Фальковский В.Г., Северянин В.С., Васин Н.В., Митин Б.А., Урецкий Е.А. - Оpubл. в Б.И., 1986, № 1.
101. А.с. № 1192468 (СССР) Способ работы камеры пульсирующего горения / Северянин В.Г., Горбачева М.Г., Субботкин Л.Д. - Оpubл. в Б.И., 1985, № 42.

СЕВЕРЯНИН Виталий Степанович



Пульсирующее горение -  
способ интенсификации  
теплотехнических процессов

Автореферат

Ответственный за выпуск - Д.Е.Николаев

Корректор - Т.В.Строкач

---

Подписано к печати 20.01.86 г. ; ДБ 21020. ; Формат  
60 x 84 1/16

Бумага оберт. Усл. п.л. 2,0 Уч.-изд.л. 2,0

Тираж 100 экз. Заказ № 55. Бесплатно

---

Реприント Брестского инженерно-строительного института.

Брест, ул. Московская, 267.