

Товажнянский Л.Л., Перцев Л.П., Данилов Ю.Б., Морозов А.Е.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НОВОГО КОНТАКТНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА  
ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ**

Укрепление экономики страны неотделимо от ускорения темпов реализации результатов, достигнутых отечественным и мировым научно-техническим прогрессом, направленных на энерго- и ресурсосбережение, в формате экологической безопасности. «Акценты в инновационном развитии смещаются к полюсу экологической целесообразности», – отметил на международной конференции «Казантип – ЭКО – 2012» академик НАНУ В.П. Семиноженко» [1].

Сказанное убедительно подтверждается результатами промышленной практики и реализацией инновационных решений, проводимых в соответствии с Государственными программами ресурсосбережения и повышения энергоэффективности производств, что, в конечном счете, положительно сказывается и на улучшении экологических условий. В плане использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) весьма эффективными оказались аппараты погружного горения (АПГ).

Коэффициент использования теплоты сгорания топлива (в действующих установках АПГ) при продувке горячих газов через объем жидкости (с утилизацией отходящего тепла) достигает 95÷97 %. По имеющимся исследованиям общая картина использования метода контактного нагрева и испарения воды и растворов выглядит следующим образом.

Отходящие дымовые газы, образующиеся при сжигании топлива, барботируя в контактном устройстве сквозь жидкость, разбиваются на огромное число газовых пузырьков, формирующих подвижную межфазную поверхность тепло- и массообмена, составляющую (в совокупности) до 1 000 кв м в одном кубическом метре барботажного слоя [2].

Установлено [4, 2, 5, 6], что интенсивное испарение осуществляется за счет активного насыщения горячих газовых пузырьков парами воды и их быстрой конденсации на обновленной внутренней поверхности (при напряженном внутреннем воспроизводстве этих процессов). Испарение происходит при равновесной температуре (температуре мокрого термометра), которая для воды, при атмосферном давлении, на 15÷16 °С ниже температуры кипения [2].

Газовые пузырьки в процессе подъема видоизменяются и укрупняются, а образовавшаяся парогазовая смесь удаляется, имея температуру на 1÷2 °С выше температуры ее кипения [2].

Такие аппараты широко используются при обезвреживании и очистке промышленных сточных вод и выпаривании растворов, содержащих минеральные соли и органические соединения. Это объясняется тем, что сточные воды затруднительно выпаривать в традиционных трубчатых или иных поверхностных аппаратах, так как наличие солей жесткости, шламов и различных механических взвесей приводит к спонтанному образованию инкрустаций греющих поверхностей, а, следовательно, к снижению передачи тепла. Включение АПГ в состав оборудования многих технологических схем позволяет замкнуть технологический цикл и решить важные производственные задачи, например:

- сократить затраты на нагрев и выпаривание технологических жидкостей;
- добиться более полной очистки сбросов загрязненных сточных вод;
- сократить потребление воды за счет создания замкнутого цикла;
- снизить капитальные затраты на сооружение теплоэнергетических устройств и очистных сооружений за счет высокой компактности и низкой металлоемкости оборудования и уменьшения эксплуатационных расходов (суммарно в 3÷5 раз);
- получить горячую воду и водяной пар производственного и коммунального назначения.

Накопленный опыт показал, что основные достоинства таких аппаратов состоят в высокой эксплуатационной надежности и экономичности.

Газовая горелка АПГ может быть встроена в корпус аппарата (как показано на рис. 1) или установлена автономно. В качестве горячих дымовых газов могут использоваться отходящие газы тепловых реакторов и машин, промышленных плавильных и нагревательных печей. Топливом может служить, как природный газ, так и распыленные жидкие углеводороды и уголь.

Созданные в Украине конструкции промышленных контактных аппаратов и методы их теплового, гидромеханического и прочностного расчетов стандартизованы «УкрНИИХиммаш» [6, 9] (в диапазоне номинальных теплопроизводительностей от 0,63 до 25 МВт), освоены производством, эксплуатируются с высокой функциональной и экономической эффективностью.

В процессе мониторинга созданных АПГ расширены области их оптимального применения, при этом, весьма перспективным оказалось направление использования их в качестве парогенераторов при

утилизации тепла отходящих газов промышленных печей и высокотемпературных реакторов с целью когерентной выработки электрической, производственной и коммунальной тепловой энергии.

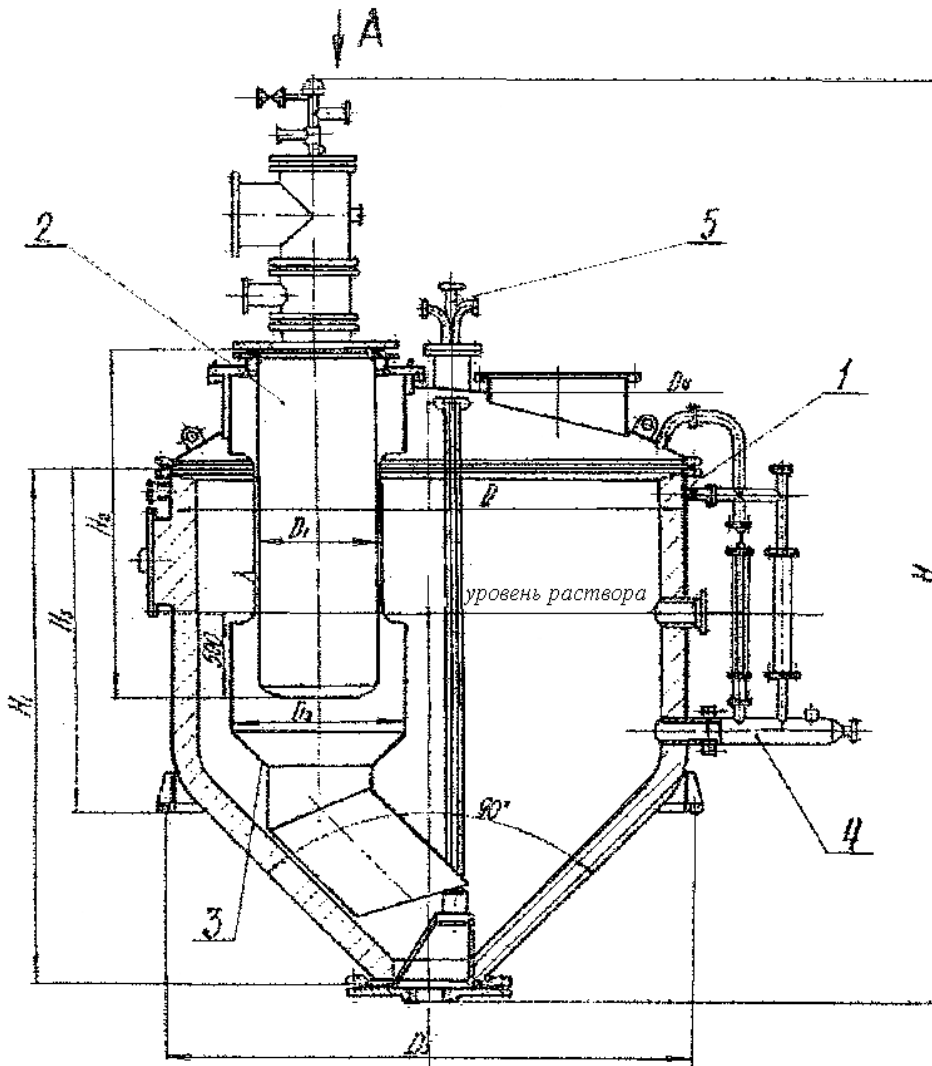


Рисунок 1 – Одна из конструкций промышленного контактного аппарата со встроенной горелкой:

- 1 – корпус; 2 – горелка (погружная труба); 3 – труба циркуляционная;  
4 – устройство для регулирования уровня жидкости, 5 – эрлифт

Новые возможности промышленного использования этого высокоэффективного выпарного оборудования открылись в связи с изобретением в Украине парогенерирующего аппарата [8] с отдельными массовыми выводами водяных паров и отработанных дымовых газов.

В мировой инженерной практике активно работают над созданием и широким промышленным использованием контактных аппаратов подобного целевого назначения такие известные фирмы, как «Nordac» (Англия), «Ozark-Mahoning», «Dow» (США), «Gaz de France» (Франция), «Уралхиммаш» Россия и др.

Одной из исполнительских схем созданного контактного устройства принята система, представленная на рис. 2, имеющая два уровня разделения фаз в аппарате, находящиеся под различными давлениями ( $P_1$  и  $P_2$ ). Поскольку выпаривается чистая вода, то химическая температурная депрессия отсутствует.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили «УкрНИИхиммаш» и НТУ «ХПИ» создать пилотную установку новой конструкции парогенератора производительностью 240 кг/час и провести ее стендовые испытания.

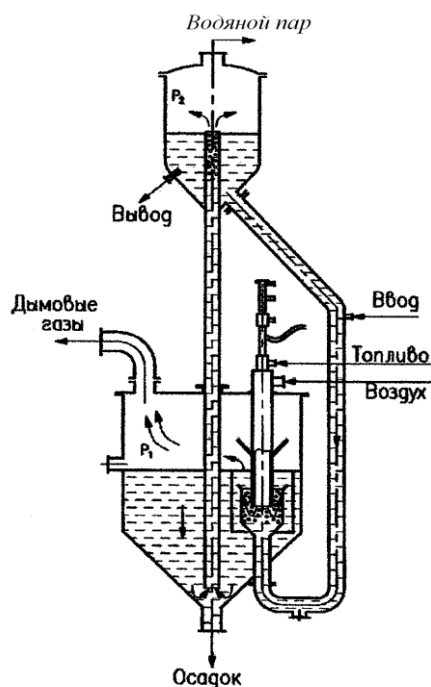


Рисунок 2 – Концептуальная схема контактно-дифференциального выпарного аппарата-парогенератора с последующим экологически безопасным выхлопом охлажденных газов в атмосферу

Управление процессом парогенерации осуществлялось в автоматическом режиме по заданной программе. Вода в нижней зоне нагревалась горячими газами до температуры несколько ниже температуры кипения и направлялась, под давлением  $P_1$  через барометрическую трубу, (выполняющую также функцию трубы вскипания) в сепаратор, где под давлением  $P_2 < P_1$  вскипала, а выделившийся пар направлялся на дальнейшие исследования. Охлажденные дымовые газы, с температурой на  $1 \div 2$  °C выше, чем нагретая в нижней емкости вода (под давлением  $P_1$ ), удалялись из аппарата с целью дальнейшей очистки, утилизации и съема оставшегося низкопотенциального тепла.

Общие энергозатраты, в рассматриваемом случае, сокращаются более, чем в 2 раза, по сравнению с затратами в традиционных парогенераторах поверхностного типа. В экологическом плане также значительно проще (и без дополнительных энергозатрат) осуществляется подавление концентрации  $NO_x$  и сопутствующих токсичных окислов высокотемпературной эмиссии продуктов горения, поскольку сама камера сгорания непосредственно погружена в воду, что быстро снижает температуру реакции горения, прекращая появление новых объемов окислов.

Следует отметить, что в конце прошлого века (фирма «General Electric» [7]) предложила, с целью подавления концентрации  $NO_x$  осуществлять «Экологический впрыск» пара (STIG) в поток раскаленных газов.

На рис. 3, (приведенном Ю.В. Полежаевым [10]), показано влияние впрыска пара на степень снижения концентрации  $NO_x$ , для двух вариантов ввода пара – в топливо и в камеру сгорания. При вводе пара концентрация окислов азота может быть снижена до норм, не превышающих допустимые. Оптимальным принято считать соотношение массы впрыснутого пара к массе топлива, 1:1.

Важной особенностью контактных теплоэнергетических парогенераторов является то обстоятельство, что в них совмещены процессы: химической подготовки питательной воды и получения дополнительной воды из пара, образовавшегося при сжигании топлива [2, 11]; удаления механических взвесей; нагрева технологической воды и получения производственного пара. Это позитивно сказывается на уменьшении металлоемкости конструкции в  $2 \div 4$  раза, снижении потребных производственных площадей, совершенствовании компактности теплоутилизационного блока; повышении экономичности установок в целом, что позволяет возводить их на промышленных объектах в открытом или полукрытом исполнении.

Новые целевые функции (теплоэнергетические) созданного контактного парогенератора существенно отличаются от таковых, свойственных традиционным аппаратам погружного горения промышленного назначения, в которых конечной целью является получение товарной продукции, генерируемая же в

аппарате тепловая энергия, поступающая из различных видов утилизируемых ВЭР, является средством осуществления их дальнейшего полезного использования. Отмеченные различия находят отражение в аппаратном оформлении выпарных установок, главным образом, в компоновочных схемах и конструкторских устройствах. Однако, научной и инженерной базой методов расчета и создания предложенных контактных парогенераторов являются общие теоретические обоснования, вытекающие из решений фундаментальных дифференциальных уравнений гидромеханики и теплообмена. Использован также накопленный массив экспериментальной и промышленной информации о работе контактных выпарных аппаратов на воде.

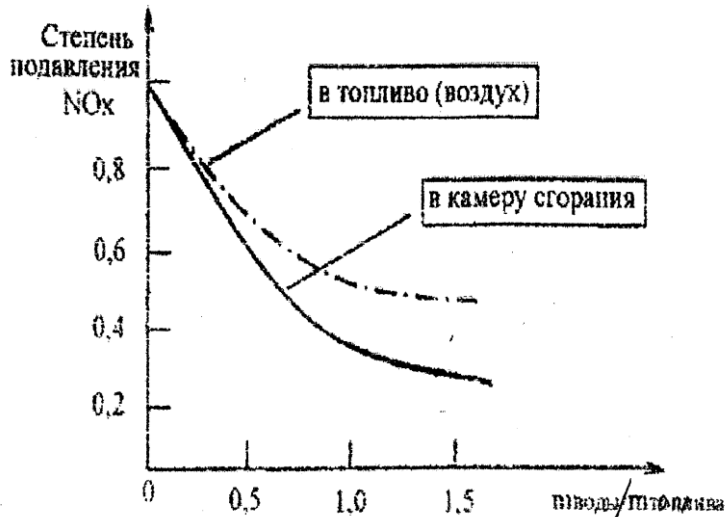


Рисунок 3 – Влияние впрыска водяного пара на подавление процесса образования NOx

Основные методические положения гидродинамических и термоэнергетических исследований в виде обобщенной научной информации, представлены зависимостями (1)–(5) и функциональными диаграммами, приведенными на рисунках 3–5, 8, 9.

Характерные расчетные параметры процессов и оборудования определяются:

– удельная межфазная поверхность формулой

$$a l_k = 2,63 A_{ro}^{0,07} (\omega' / \omega'')^{-0,22} (\rho' / \rho'')^{-0,28} (h / d_0)^{0,13}; \quad (1)$$

– оптимальная глубина погружения горелки (или погружной трубы в случае использования отходящих газов) соотношением

$$h = K_1 \frac{Q}{a \cdot \alpha \cdot F_2 \cdot \Delta t}; \quad (2)$$

– мощность передаваемого теплового потока зависимостью

$$Q = \alpha F_2 \Delta t; \quad (3)$$

– число Нуссельта зависимостью

$$Nu = 0,2 Re^{0,55} K_\phi^{0,3}. \quad (4)$$

Обозначения, принятые в расчетных формулах:  $Re = \frac{\omega'' l_k}{\nu}$  – число Рейнольдса;  $K_\phi = r / (c'' \Delta t)$ ;

$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda''}{l_k}$  – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к воде;  $l_k = \left[ \frac{\sigma}{g} (\rho' - \rho'') \right]^{1/2}$  – капиллярная постоянная;  $\lambda''$  – коэффициент теплопроводности;  $a$  – удельная поверхность контакта фаз,  $m^2/m^3$ ;  $\nu$  –

кинематическая вязкость теплоносителя;  $r$  – теплота парообразования воды;  $c''$  – теплоемкость газа;  $\Delta t$  – температурный напор;  $A_{ro}$  – модифицированное число Архимеда;  $Ku = \frac{\omega'' \cdot \sqrt{\rho''}}{\sqrt{g \cdot \sigma (\rho' - \rho'')}} -$  критерий

Кутателадзе, характеризующий устойчивость газожидкостной системы,  $Ku \leq 0,5$ ;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\rho', \rho''$  – плотность жидкости и газа;  $\omega', \omega''$  – приведенные скорости жидкости и газа внутри циркуляционной трубы;  $h$  – глубина погружения горелки;  $d_0$  – диаметр сопла горелки (погружной трубы);  $\mu$  – вязкость жидкости;  $F_s$  – межфазная поверхность теплообмена;  $c = \frac{\mu' \cdot \omega''}{\sigma}$  – критерий капиллярности.

На рис. 4а показана удельная поверхность контакта фаз в функции критерия капиллярности  $C$ , а на рис. 4б показаны расчетные зависимости парогазовой смеси  $t''$  и воды  $t'$  в зависимости от глубины погружения горелки (погружной трубы). Точками показаны результаты экспериментов.

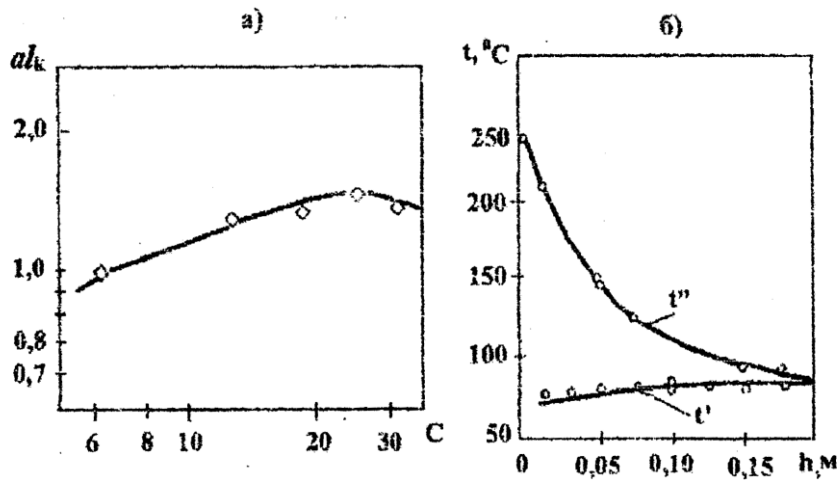


Рисунок 4 – Характеристика работы контактного парогенератора:

- а) – удельная поверхность контакта фаз в зависимости от критерия капиллярности  $C$ ;
- б) – влияние глубины погружения горелки (погружной трубы) на температуру газовой смеси  $t''$  и воды  $t'$

Зависимость температуры выпаривания воды в контактном парогенераторе в функциях; коэффициента избытка воздуха и испарительности показана на рис. 5.

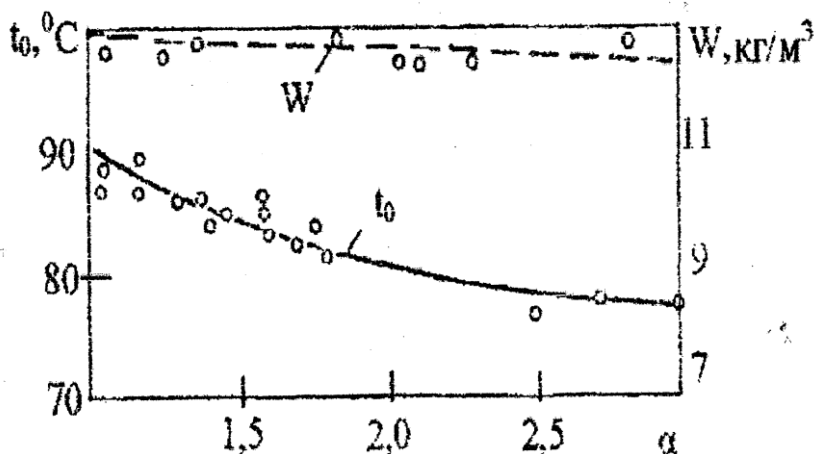


Рисунок 5 – Зависимость температуры выпаривания  $t_0$  и удельной испарительности  $W$  от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$

Созданная стендовая установка (рис. 6) позволила исследовать процесс генерации пара на режимах, характерных, главным образом, для теплоутилизационных устройств отходящих дымовых газов и их безопасного отвода в окружающую среду.

Изменение давлений в зонах вакуумного испарения и контактного подогрева соответственно изменяет параметры процесса выпаривания, в том числе, температуры генерируемого пара и отводимых газов.

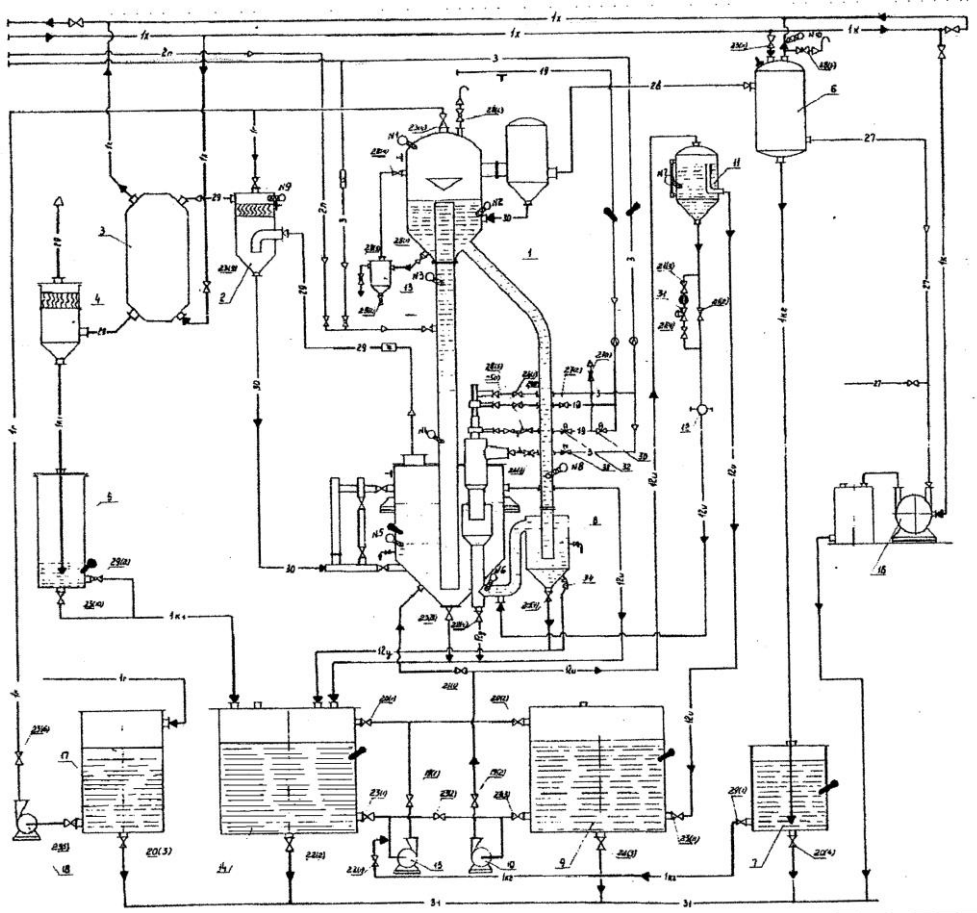


Рисунок 6 – Технологическая схема стендовой экспериментальной опытно-промышленной установки (со встроенной горелкой)

Движущими силами циркуляции жидкости в контуре являются: эрлифтный эффект, возникающий в зоне контактного подогрева при барботаже газовых потоков сгоревшего топлива, истекающих из погружной трубы, и естественная тяга, определяемая «холодной» и «горячей» ветвями контура циркуляции, усиливаемая вскипанием воды в верхней части подъемной трубы.

Концептуально влияние эрлифтного эффекта продуктов сгорания топлива на циркуляцию жидкости в зоне контактного подогрева, подобно тому, как это происходит и в традиционных типовых аппаратах с погружными горелками.

Лабораторные и стендовые исследования позволили построить общие закономерности для определения: оптимальных геометрических размеров конструкций и скоростей циркуляции жидкости; параметров контактного нагрева и охлаждения (в зонах барботажа газов и испарения воды); влияния указанных факторов на распределение скоростей циркуляции потоков в контуре.

Исследования влияния зоны контактного подогрева на циркуляцию жидкости включали задачи: изучения процессов, происходящих в зоне контактного подогрева, представляющей собой кольцевое пространство, образованное барботажной и погружной трубами, концентрично установленными в барботажной емкости (рис. 2).

Начальными параметрами проведения экспериментов приняты: внутренний диаметр барботажной трубы  $D = 290$  мм; наружный диаметр погружной горелки  $d_n = 200$  мм; диаметр выходного отверстия погружной горелки  $d = 110$  мм; эквивалентный диаметр зоны барботажа  $d = 90$  мм; глубина погружения горелки  $h = 350$  мм; внутренние диаметры труб: подъемной  $d_n = 350$  мм и опускной  $d_o = 138,5$  мм.

Измерения скоростей циркуляции жидкости производились в подъемной и опускной трубах датчиками скорости (микровертушками), установленными по осям труб с возможностью измерения скорости в любой точке диаметра и построения полей скоростей.

Конструкция датчика, измерителя скорости, приведена на рис. 7.

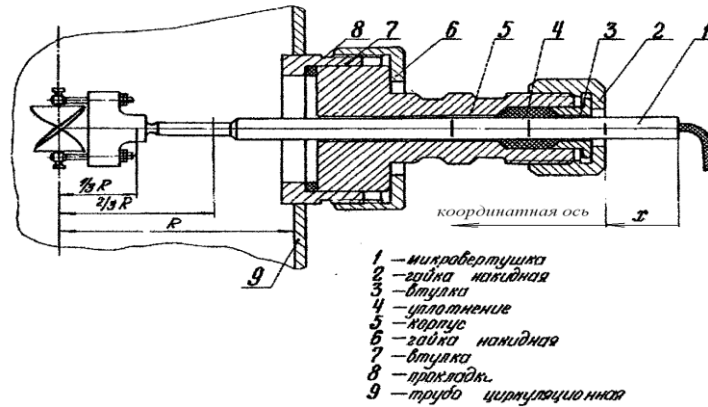


Рисунок 7 – Датчики измерения скорости потока (микровертушка)

Скорость вращения ротора датчика протарирована по объемной скорости потока жидкости в трубе. За каждый оборот ротора измерялись два импульса электрического сигнала, которые проходили усилитель и фиксировались частотомером Ф 5080. Погрешность тарировочного графика зависимости скорости потока жидкости в трубе от частоты импульсов не превышала  $\pm 1,5\%$ .

По средней скорости жидкости в трубах определялась приведенная скорость компонентов потока в кольцевом сечении зоны барботажа.

Для расчета контура циркуляции жидкости в выпарном аппарате-парогенераторе с погружной горелкой рекомендована формула

$$Re'_k = 311,5 \cdot (Re''_k)^{0,185} \cdot \left(\frac{h}{d_3}\right)^{0,506} \cdot r^{-0,712}, \quad (5)$$

где  $Re'_k = \frac{\omega'_k d_3}{\nu'}$  – число Рейнольдса потока в зоне барботажа;  $Re''_k = \frac{\omega''_k d_3}{\nu''}$  – число Рейнольдса газового потока в зоне барботажа;  $h$  – глубина погружения горелки;  $d_3 = D - d_n$  – эквивалентный диаметр в зоне барботажа;  $r = d^2 / (D^2 - d^2)$  – геометрический симплекс, характеризующий отношение площадей сечений выходного отверстия погружной горелки и эквивалентного диаметра;  $\omega'_k, \omega''_k$  – приведенные скорости, соответственно, жидкостного и газового потоков в зоне барботажа;  $d$  – диаметр выходного отверстия в погружной горелке;  $d_n$  – наружный диаметр погружной горелки в зоне барботажа;  $D$  – внутренний диаметр барботажной (циркуляционной) трубы;  $\nu', \nu''$  – кинематическая вязкость, соответственно, жидкости и газа.

Количество воздуха в эксперименте соответствовало эквивалентному количеству продуктов сгорания природного газа при теплопроизводительности погружной горелки  $Q = 116,3$  кВт и коэффициенте избытка воздуха  $\alpha_b = 1,5$ .

Анализ опытных данных показывает, что уровень жидкости относительно верхнего торца трубы вскипания в сепараторе заметно влияет на циркуляцию жидкости, что необходимо учитывать при конструировании.

Анализ влияния уровня жидкости в вакуум-сепараторе на циркуляцию в аппарате показал, что приведенная скорость жидкости в испарительном режиме практически удваивается по сравнению с начальным периодом нагрева жидкости.

Результаты опытных данных приведены на рис. 8. Следует отметить, что скорость жидкости, приведенная к сечению эквивалентного диаметра зоны барботажа, прямо пропорциональна (в исследованных пределах) приведенной скорости воздуха в этом сечении.

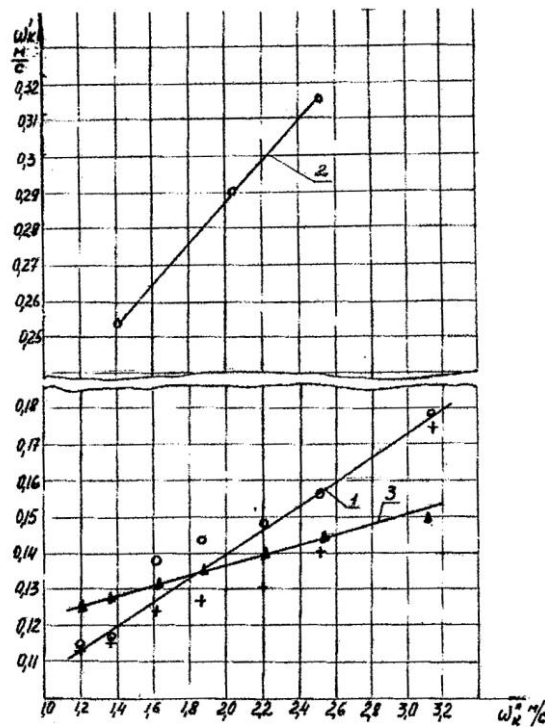


Рисунок 8 – Влияние зоны контактного подогрева и парообразования на циркуляцию жидкости в аппарате: знаками «+» и «o» – отмечены скорости жидкости, приведенные к сечению зоны барботажа по средним скоростям, соответственно, в подъемной и опускной трубах;  
 ▲ – значения рассчитанных скоростей жидкости; 1 – опыты на холодном стенде; 2 – опыты на горячем стенде; 3 – расчетная зависимость

Зависимость температуры выпаривания воды в функции от давления  $P$  и испарительности показана на рис. 9.

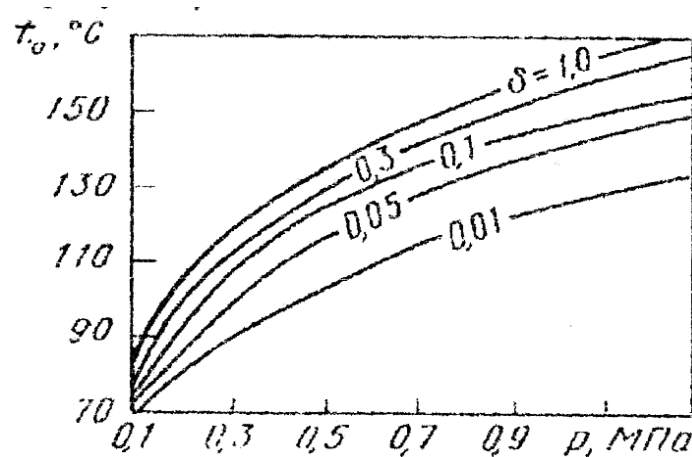


Рисунок 9 – Зависимость температуры выпаривания воды от давления  $P$  и испарительности

Построенные аналитические и эмпирические зависимости процессов теплообмена и гидродинамики позволили создать ряд лабораторных физических экспериментальных моделей, показавших при испытаниях адекватность полученных закономерностей.

Полученная научная и практическая информация позволяет разработать и изготовить опытно-промышленную установку созданного контактного парогенератора для проведения комплексных промышленных испытаний на действующих промышленных производствах в параметрических режимах: парогенерации, программного управления; уноса рабочих сред; выбросов в окружающую среду



и определения сравнительных экономических характеристик использования газообразных, жидких или измельченных твердых топлив.

### Литература

1. Сборник трудов «КАЗАНТИП – ЭКО – 2012», том II.
2. Алабовский А.Н., Удыма П.Г. – Аппараты погружного горения – Москва: МЭИ, 1994.–254 с.
3. Товажнянский Л.Л., Анипко О.Б., Маляренко В.А., Абрамов В.И., Кривцова В.И., Капустенко П.А. Основы энерготехнологии в промышленности. – Харьков НТУ «ХПИ», – 2002.– 436 с.
4. Кутателадзе С.С., Стыркович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия. – 1976. – 296 с.
5. Скрипко В.Я., Сорока Б.С. К вопросу о движении газового пузырька через слой жидкости.// Теплообмен. – К.: Наукова думка. – 1968. – С. 6–9.
6. Перцев Л.П., Ковалев Е.М., Волов Г.И. Аппараты погружного горения. Тезисы докладов Первой Всесоюзной научно-технической конференции «Пути совершенствования и внедрения аппаратов погружного горения, обеспечивающих значительную экономию топлива», – Харьков – Москва, ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. – 1986. – 5 с.
7. Бернем, Джулиани, Меллер. Разработка, монтаж и испытание систем впрыска пара (STIG) в газогенератор LM – 5000 фирмы «General Electric» // Энергетические машины и установки. – № 2. – 1988. – С. 11–17.
8. А.с. 479477 СССР. Выпарной аппарат / Г.И. Волов, Л.П. Перцев, Н.Г. Шмакова, М.А. Харченко, К.Е. Перепелкин, опубли. 05.08.75, Бюл. № 29.
9. Товажнянский Л.Л., Перцев Л.П., Шапорев В.П., Данилов Ю.Б., Морозова Н.Л., Лопухина О.А. // Теплоэнергетика погружного горения в решении проблем теплоснабжения и экологии Украины. – Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПИ», 2001.– №3.
10. Полежаев Ю.В. Возможность создания высокоэффективных энергоустановок на базе конвертируемых авиационных газотурбинных двигателей.//Проблемы машиностроения. Т. 1, № 1 – изд. ИПМАШ им. А.Н. Подгорного НАН Украины – Харьков.
11. Носач В.Г., Шрайбер А.А. Повышение эффективности газотурбинных установок за счет совместного использования термохимической и паровой регенерации.// Промышленная теплотехника, 2011, т. 33.

УДК 66.048.57

Товажнянский Л.Л., Перцев Л.П., Данилов Ю.Б., Морозов О.Е.

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ НОВОГО КОНТАКТНОГО ПАРОВИКОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ВІДХОДЯЩИХ ГАЗІВ

Запропонована нова технологічна схема та патентоспроможна конструкція контактної парогенератора, що використовує теплоту димових газів, що відходять від теплових реакторів, машин та плавильних печей. Це дозволяє відокремлювати охолоджені димові гази від виробленої (цільовим призначенням) водяної пари необхідних параметрів. Відпрацьовані димові гази (зі зменшеною концентрацією  $\text{NO}_x$  і нормативно-припустимим «тепловим забрудненням») безпечно відводяться в навколишнє середовище. Наведені характерні параметри стендових випробувань дослідно-промислової установки продуктивністю 240 кг/година.

Tovazhnyansky L., Persev L., Danylov Y., Morozov A.

### INVESTIGATION WORK NOVELTY CONTACT STEAM GENERATOR UTILIZATION HIGH-TEMPERATURE VOLATILE GAS

New technological environment-protective high-temperature volatile gas contact steam generator scheme and design are proposed for thermal reactors, industrial aggregates and heat furnaces. They allow to separate the water vapour of required parameters from the high-temperature concentrated  $\text{NO}_x$  volatile gas with the admissible «thermal pollution». The efficiency of the pilot installation is 240 kg of high-temperature volatile gas, as the stand tests have shown.