

УДК 536.423.4

doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.19

**М. К. БЕЗРОДНЫЙ, А. Ю. РАЧИНСКИЙ, Н. Н. ГОЛИЯД****МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА КОНТАКТНОГО ГАЗОКАПЕЛЬНОГО  
УТИЛИЗАТОРА ТЕПЛОТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ**

**АННОТАЦИЯ** Разработана методика расчёта контактного аппарата газокapelного типа для утилизации теплоты низкотемпературных отходящих газов. Для распыления жидкости использовалась механическая центробежная форсунка. Данная методика учитывает реальные условия протекания процессов тепло- и массообмена в системе «конус факела распыливания капель жидкости – сплошная парогазовая среда» и основана на использовании результатов ранее проведённых экспериментальных исследований авторов в указанной системе.

**Ключевые слова:** методика, контактный утилизатор теплоты, газокapelный, форсунка.

**M. BEZRODNY, A. RACHINSKIY, N. GOLIYAD****HEAT CALCULATION TECHNIQUE FOR THE CONTACT-TYPE GAS-DROP HEAT  
RECOVERY SYSTEM OF LOW-TEMPERATURE EFFLUENT GASES**

**ABSTRACT** A purpose of this scientific paper is to develop the heat calculation technique for the contact-type heat recovery system of low-temperature effluent gases using mechanical centrifugal nozzles to spray liquid. The calculation technique is based on preliminary experimental investigations carried out by the authors to study nozzle dispersion characteristics and heat-mass exchange processes in the two-phase system: the torch cone used for the dispersion of water drops is the steam-gas mixture and it is also based on the preliminary theoretical analysis of the total interfacial area of interacting phases. The work done allowed us to work out the heat calculation technique for the contact-type heat recovery system of low-temperature effluent gases that takes into consideration real conditions for transfer processes in the two-phase system in question. The heat calculation procedure described in the paper and used for the heat recovery system allows us to determine the brand and the number of dispensers required for the generation of water drops using the parameters of effluent gases and water specified for the system inlet, to arrange them in the standard duct for the gas withdrawal and to calculate the heat carrier parameters at the unit output and to determine its heating efficiency.

**Key words:** technique, contact-type heat recovery unit, gas-drop, and the nozzle.

**Введение**

В настоящее время заметное внимание уделяется вопросам использования вторичных энергетических ресурсов в виде теплоты низкотемпературных отходящих газов энергетических и технологических агрегатов и устройств. Для решения этих вопросов предложены и используются различные конструкции утилизаторов теплоты контактного типа. Несомненными преимуществами при утилизации теплоты отходящих газов энергетических и технологических установок обладают утилизационные контактные аппараты газокapelного типа [1] с распылителями воды в виде форсунок различных типов (зачастую центробежных, как имеющих наиболее простую конструктивную схему и обширную литературу по их характеристикам, например, [2]). Вместе с тем, в литературе отсутствует надежная методика теплового расчета подобных устройств. В известной литературе отсутствуют также какие-либо обобщающие зависимости по тепломассообмену между сплошной газовой средой и системой капель в виде конуса распыливания форсунки. Используемые в литературе данные относятся, как правило, к одиночной капле [3–8].

В связи с этим для создания указанной методики предварительно был выполнен комплекс работ, связанных с адаптацией центробежных

форсунок для работы в качестве распылителей воды в контактных утилизационных аппаратах. С этой целью в работах [9, 10] были выполнены экспериментальные исследования характеристик распыла (среднего объемно-поверхностного диаметра капель, угла раскрытия конуса факела распыливания) применительно к режимным параметрам их работы в составе утилизатора теплоты. Кроме того, в работе [11] теоретическим путем был решен ряд вопросов, связанных с определением элементов гидродинамики форсуночной камеры аппарата (изменения скорости движения капель по длине их пробега, суммарной величины межфазной поверхности), определяющих условия тепломассообмена между газовой средой и каплями жидкости. И, наконец, в работе [12] были проведены экспериментальные исследования коэффициентов тепло- и массоотдачи между парогазовой средой и системой капель воды распылительной форсунки.

Важным условием эффективной работы контактного аппарата для утилизации теплоты отходящих газов является обеспечение таких параметров работы, при которых имеет место конденсация водяных паров и отсутствует режим испарения воды с поверхности капель. Экспериментальному исследованию этого вопроса посвящена работа авторов [13]. В ней в результате проведенных опытов определены параметрические границы (режимные параметры работы) эффективного ис-

пользования выбранной форсунки (с исключением процесса испарения капель).

Указанные работы явились основой для создания излагаемой ниже методики теплового расчёта контактных утилизаторов теплоты газокapельного типа.

### Цель работы

Разработать методику теплового расчёта утилизационных контактных аппаратов газокapельного типа с распылителями воды в виде форсунок различных типов. Для достижения этой цели был предварительно выполнен комплекс работ, связанных с адаптацией центробежных форсунок для работы в качестве распылителей воды в контактных утилизационных аппаратах.

### Схема аппарата и общие замечания к методике расчёта

Схема контактного утилизатора теплоты газокapельного типа представлена на рис. 1. Конструктивно активная часть утилизатора представляет собой полый аппарат, внутреннее пространство которого заполнено только определенным количеством форсунок с подводящими к ним воду трубопроводами. В связи с этим тепловой расчёт такого аппарата сводится к определению марки и количества распылителей, их компоновке в газотводящем коробе, определению параметров потоков теплоносителей на выходе и теплопроизводительности утилизатора.

Для определённости, по мнению авторов, перед изложением собственно процедуры расчёта газокapельного утилизатора целесообразно упомянуть о некоторых основных моментах, имеющих значение при проектировании таких устройств.

Во-первых, отметим, что рассматриваемое устройство предназначено для утилизации низкотемпературных отходящих газов. Низкотемпературными считаются отходящие газы с температурой  $\sim 135^\circ\text{C}$  на входе в аппарат из-за возможности возникновения низкотемпературной коррозии в различного рода экономайзерах и иных поверхностных утилизаторах, которые необходимо устанавливать до газокapельного устройства. С другой стороны, приблизительно такая же температура газовой смеси регламентируется наличием верхнего предела нагрева капель воды, равного температуре «мокрого» термометра для парогазовой смеси.

Во-вторых, вопрос об определении количества разбрызгивающих форсунок решается с помощью результатов предварительных исследований, изложенных в работах [12, 13]. Здесь же отметим, что возникает еще один актуальный вопрос о вероятности столкновения капель в дисперсных потоках, образованных различными распылителя-

ми. В связи с этим может изменяться дисперсный состав капель по причине этого столкновения. Ответы на эти вопросы приведены ниже в процедуре расчёта.

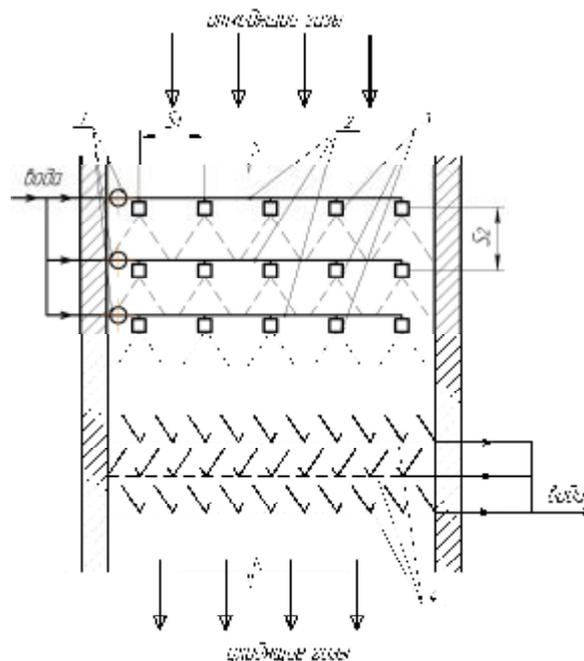


Рис. 1 – Схема контактного аппарата:  
1 – коллекторы для подвода воды; 2 – трубы подвода воды к форсункам; 3 – форсунки; 4 – сепаратор

В-третьих, вопрос об определении параметров потоков отходящих газов и воды после контактного утилизатора при заданных значениях этих величин на входе в участок утилизации решается с помощью обобщающих зависимостей по тепло- и массообмену в газокapельной системе, представленных в работе [12].

### Исходные данные для расчёта

Как правило, среди исходных данных должны фигурировать следующие величины:

- вид и рабочий состав топлива для энерго-технологического агрегата (устройства);
- барометрическое давление парогазовой смеси (ПГС),  $B$ , Па;
- объёмный расход парогазовой смеси при нормальных условиях на входе в газокapельный аппарат,  $V$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;
- средняя скорость движения отходящих газов (либо сечение отводящего короба);
- схема движения потоков газа и капель воды (принимается прямоточную);
- температура смеси по «сухому» термометру на входе в аппарат,  $t_{2\text{с.вх}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ;
- влагосодержание ПГС на входе в аппарат,  $d_1$ ,  $\text{кг}/(\text{кг сух. г.})$ ;

- давление воды перед форсунками,  $P_1$ , МПа;
- температура воды на входе в аппарат  $t_{1вх}$ , °С.

### Процедура расчёта

Процедура расчета газокпельного контактного утилизатора следующая.

#### 1 Выбор марки и количества разбрызгивающих форсунок

Ориентиром при решении вопроса о выборе марки распылителя может быть работа [2]. Рекомендуется центробежный тип распылительной форсунки как имеющей наиболее простую и надежную конструктивную схему. Для энерготехнологических устройств небольшой мощности можно предложить стандартную центробежную форсунку № 26 [2], которая использовалась авторами при проведении настоящих исследований. Тем более, что авторы поработали над адаптацией этого распылителя для более широкого диапазона режимных параметров ее работы применительно к указанным энерготехнологическим устройствам.

Для расчета количества разбрызгивающих форсунок указанной марки авторами были проведены специальные исследования [13]. Эти исследования были посвящены определению параметрических границ эффективного использования выбранной форсунки. Соответствующие границы определены, исходя из условия исключения возможного испарения капель воды при достижении предельной температуры их нагрева, соответствующей температуре мокрого термометра. Эти условия соответствуют максимальному расходу сухих газов на одну форсунку  $V_B^{max}$ , определяемому из рис. 2 в зависимости от объемной доли содержащегося в них водяных паров и давления воды перед форсункой. Тогда, общее количество форсунок  $n$  может быть определено как

$$n = \frac{V}{V_B^{max}}, \quad (1)$$

Величина  $V_B^{max}$  рассчитывается также по формулам (2)–(4) из работы [13].

#### 2 Компоновка форсунок в коробе для отвода отходящих газов

При компоновке форсунок следует учитывать вопрос о вероятности столкновения капель в дисперсных потоках, образованных различными распылителями, и связанным с этим возможным изменением дисперсного состава капель по причине этого столкновения. Оказалось (работы [14, 15]), что вероятность  $p$  столкновения жидкостных частиц чрезвычайно мала ( $p < 0,001$ ) из-за незначительного отличия их скоростей вблизи распылителей и резкого снижения их концентрации при удалении от места вылета (на расстоянии

нескольких сантиметров эта вероятность приближается к нулю). Исключение может составлять лишь очень плотная установка форсунок, что применяется крайне редко. Для примера: факелы двух центробежно-струйных форсунок, установленных на расстоянии 150 мм, оказались «прозрачными» друг для друга [14].

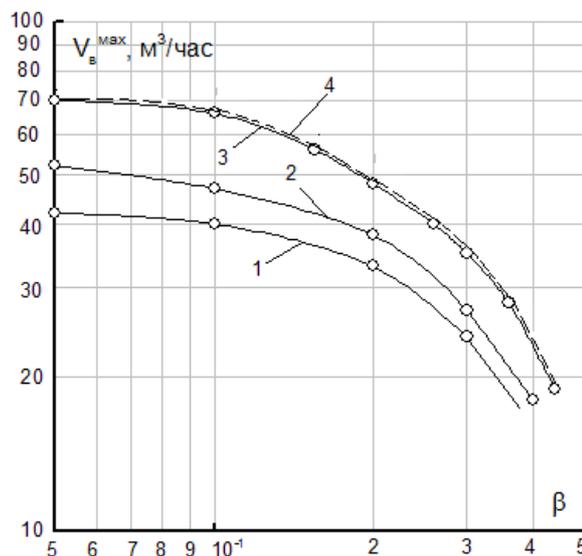


Рис. 2 – Зависимость максимального объемного расхода сухого воздуха от объемной доли водяных паров  $\beta$  при избыточном давлении воды перед форсункой: 1 –  $P = 0,2$  МПа; 2 –  $0,4$  МПа; 3 –  $0,6$  МПа; 4 – расчет по [13]

По поводу изменения дисперсного состава капель по причине возможного их столкновения отметим следующее. Происходящие столкновения не могут привести к заметному изменению дисперсного состава капель из-за низких значений числа  $We$ , характерных для распыливания жидкостей и изменяющихся всего-навсего в пределах 0,5–10. Кроме того, влияние полидисперсности капель, их коалесценция и дробление учитываются при определении среднего диаметра капель.

Следовательно, размещение форсунок в поперечном сечении короба  $S_k$  может быть принято в узловых точках сетки с размером её ячейки  $S_я = 150 \times 150$  мм, т.е. с поперечным шагом  $S_1 = 150$  мм. Тогда, количество ячеек и соответствующее количество форсунок в одном ярусе может быть определено как

$$n_я = \frac{S_k}{S_я}, \quad (2)$$

а число ярусов форсунок по высоте аппарата

$$N = \frac{n}{n_я}. \quad (3)$$

Величина шага размещения форсунок по высоте аппарата  $S_2$  выбирается на основании

опытных данных. Согласно этим данным [12] на высоте конуса распыливания от среза сопла  $H = 110$  мм практически заканчиваются процессы конвективной теплоотдачи от ПГС к каплям и конденсации паров воды на их поверхности. Тогда, продольный шаг размещения форсунок может быть принят равным  $S_2 = 110$  мм.

### 3 Определение параметров системы со стороны факела распыливания

Параметры форсунки и факела распыливания определяются по данным работ [9, 10]. При этом массовый расход воды через форсунку в функции давления воды перед её соплом (в диапазоне изменения  $p = 0,2-0,6$  МПа) определяем по формуле

$$G = 34,74p + 8,17. \quad (4)$$

Угол факела распыливания  $\alpha$ , град., в функции давления воды перед форсункой (в диапазоне изменения  $p = (0,2-0,6)$  МПа) рассчитывается по уравнению

$$\alpha = 13,3 + 283,84p - 286,1p^2. \quad (5)$$

Средний объёмно-поверхностный диаметр каплей  $d_{32}$  в конусе распыливания форсунки определяется по обобщённому уравнению

$$\frac{d_{32}}{d_c} = 35,7Eu^{0,39}(Re We)^{-0,52}, \quad (6)$$

где  $Re = \frac{W_Y d_c}{\nu}$ ;  $We = W_Y \sqrt{d_c} \frac{r}{s}$ ;  $Eu = \frac{Dp}{r W_Y^2}$ ;

$W_Y = \frac{4G}{\rho d_c^2 r}$ ;  $Dp$  – перепад давления потока воды, срабатываемый в форсунке;  $d_c$  – диаметр сопла.

### 4 Определение параметров парогазовой смеси (ПГС) на выходе из активной зоны контактного аппарата

Для определения параметров ПГС на выходе из утилизатора достаточно произвести их расчет применительно к одному вертикальному ряду распылителей. При этом число распылителей в ряду соответствует числу ярусов форсунок в аппарате.

Общий расчёт параметров теплоносителей для одного ряда форсунок сводится к последовательному расчету параметров на выходе из конуса распыла для каждой форсунки. При этом входные параметры для первой форсунки заданы в исходных данных для всего аппарата, а входные параметры для каждой последующей форсунки принимаются равными выходным параметрам для предыдущей форсунки. Схема расчета состоит в следующем.

Полная тепловая нагрузка  $Q^1$  для первого (верхнего) по ходу ПГС распылителя определяется по формуле

$$Q^1 = c_{рв} G (t_{1\text{вых}} - t_{1\text{вх}}). \quad (7)$$

В этих расчётах принимается, что испарение каплей (и, следовательно, конденсация вторичного, образующегося по этой причине пара) в конце каждого шага расположения вертикального ряда форсунок пренебрежимо мало (из-за поступления очередной порции распыла холодной воды из следующего распылителя). Температура воды на выходе  $t_{1\text{вых}}$  в первом приближении может быть принята равной предельной температуре нагрева в зависимости от давления воды и доли пара в ПГС в соответствии с рис. 3.

Далее в соответствии с экспериментальными данными принимаем, что температура «сухого» термометра для ПГС на выходе на  $(1-3)$  °C выше температуры  $t_{1\text{вых}}$  и определяем конвективную составляющую теплового потока

$$Q_{\text{конв}} = a_k F \overline{DT}. \quad (8)$$

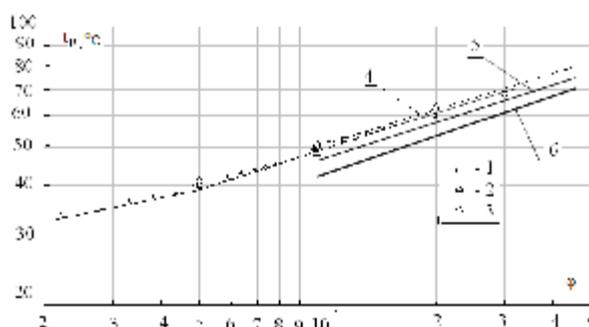


Рис. 3 – Зависимость максимальной температуры нагретой воды от объёмной доли водяных паров при избыточном давлении воды перед форсункой: 1 –  $P = 0,6$  МПа; 2 –  $0,4$  МПа; 3 –  $0,2$  МПа; 4 – по данным [16], 5 – по данным [18], 6 – по данным [17]

В формуле (8) коэффициент конвективной теплоотдачи  $a_k$  определяется из обобщённого уравнения (9)

$$a_k = 1,97 \frac{1_{\text{см}}}{d_{32}} Re^{0,53} Pr^{0,33} \quad (9)$$

по данным работы [12] в зависимости от расчётной средней скорости движения каплей на заданном участке длины пробега, определяемой в свою очередь с помощью рис. 4.

В уравнении (9):  $Re = \frac{W d_{32}}{\nu_{\text{см}}}$ ;  $F$  – расчётная

величина межфазной поверхности, принимается по рис. 5;  $\overline{DT}$  – среднелогарифмический температурный перепад, который определяется с учетом принятой температуры «сухого» термометра для ПГС на выходе.

После этого определяем конденсационную составляющую  $Q_{\text{конд}}$  общего теплового потока  $Q^1$  для первой форсунки рассматриваемого вертикального ряда

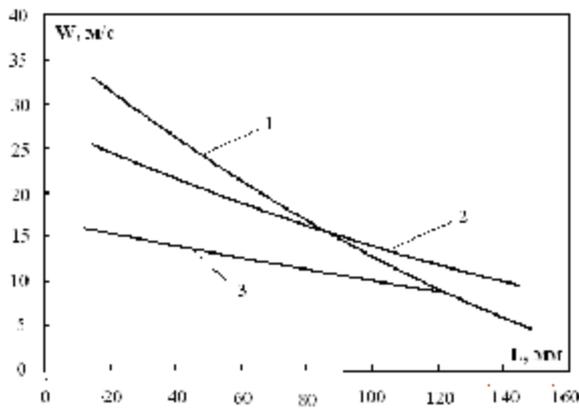


Рис. 4 – Зависимость скорости движения капель  $W$  от длины их пробега  $L$  при разных давлениях воды перед форсункой по [11]: 1 –  $P = 0,6$  МПа; 2 –  $P = 0,4$  МПа; 3 –  $P = 0,2$  МПа

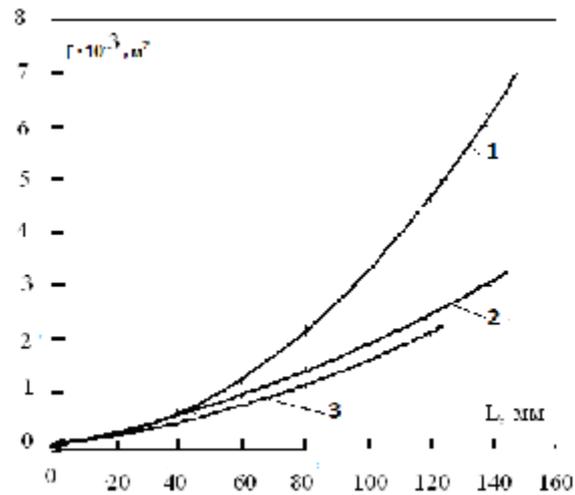


Рис. 5 – Зависимость расчётной величины межфазной поверхности  $F$  от длины их пробега  $L$  при разных давлениях воды перед форсункой по [11]: 1 –  $P = 0,6$  МПа; 2 –  $P = 0,4$  МПа; 3 –  $P = 0,2$  МПа

$$Q_{\text{конд}} = Q^1 - Q_{\text{конв}} \quad (10)$$

и сравниваем  $Q_{\text{конд}}$  по уравнению (10) со значением этой величины  $Q_{\text{конд}}$ , рассчитанным через экспериментальное значение коэффициента массоотдачи  $b$ , определяемое из обобщённой зависимости (3) по данным работы [12]:

$$Nu_D = 0,96 Re^{0,55} Pr_D^{0,33} e^{0,55},$$

$$Nu_D = \frac{b d_{32}}{D}, \quad Pr_D = \frac{n_{\text{см}}}{D},$$

$$D = \frac{2,28}{133,3B} \frac{\dot{\epsilon}_c^{\text{cp}} + 273 \dot{u}^{1,8}}{\dot{\epsilon} \dot{u}}.$$

$$Q_{\text{конд}} = jrF = \overline{b_P} D_{pr} F = b \frac{m_{H_2O}}{RT} \overline{D_{pr}} F, \quad (11)$$

где  $Nu_D$  – диффузионное число Нуссельта;  $D$  – коэффициент диффузии;  $Pr_D$  – диффузионное

число Прандтля;  $b = \overline{b_P} \frac{RT}{m_{H_2O}}$ ;  $\overline{b_P}$  – средний ко-

эффициент массоотдачи, отнесённый к разности парциальных давлений;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – средняя абсолютная температура смеси;  $m_{H_2O}$  – молекулярная масса водяного пара;  $\overline{D_{pr}} = P_{\text{п.о.}} - P_{\text{п.в.}}$  – разность средних парциальных давлений водяных паров в объёме ПГС и на поверхности капель рассматриваемого участка.

С другой стороны

$$Q_{\text{конд}} = G_{\text{г.с.}} (d_1 - d_2) r, \quad (12)$$

откуда

$$d_2 = d_1 - \frac{Q_{\text{конд}}}{G_{\text{г.с.}} r}. \quad (13)$$

В последних формулах:  $G_{\text{г.с.}} = V_{\text{г.с.}} \rho_{\text{г.с.}}$  – массовый расход сухих отходящих газов;  $V_{\text{г.с.}}$  – объёмный расход тех же газов (определённый согласно п. 1 настоящей процедуры);  $\rho_{\text{г.с.}}$  – плотность сухих отходящих газов (принимается равной плотности сухого воздуха [19] при температуре его поступления в энерготехнологический агрегат).

Таким образом, по уравнению (10) определяется величина  $Q_{\text{конд}}$ , а по уравнению (13) –  $d_2$ . Далее, определив прежде по формуле

$$P_{\text{п}} = \frac{133,3Bd}{579 + d}, \quad (14)$$

парциальное давление водяных паров в ПГС в начале и в конце рассматриваемого участка, можно рассчитать среднее для участка значение  $\overline{D_{pr}}$ , и, наконец, определить величину  $Q_{\text{конд}}$ .

Сравнение величины  $Q_{\text{конд}}$ , рассчитанной по (10), с величиной  $Q_{\text{конд}}$ , рассчитанной по (11), дает ответ на вопрос о правильности выбора температуры воды и температуры «сухого» термометра для ПГС на выходе после первой форсунки рассматриваемого ряда.

Если значения этих величин отличаются более чем на 10 %, то тогда необходимо задаться новым значением температуры воды и температуры «сухого» термометра для ПГС, повторив затем проделанные вычисления. Полученные в итоге итерационного процесса значения температур и влагосодержания смеси на выходе после первой форсунки принимаются в качестве исходных данных для второй форсунки, после чего аналогичным образом рассчитываются параметры теплоносителей на выходе из активной зоны данной форсунки. Расчет повторяется до определения параметров ПГС на выходе после активной зоны последней форсунки, т.е. на выходе из контактного аппарата.

5 *Определение температуры нагретой воды на выходе из контактного аппарата.*

Учитывая то, что влагосодержание ПГС по ходу движения газов резко меняется, температура воды на выходе из активной зоны каждой форсунки по высоте аппарата также будет изменяться. При этом с учетом того, что расходы воды на все форсунки одинаковы, средняя температура воды на выходе из аппарата может быть определена как среднеарифметическое значение температур воды на выходе для активных зон отдельных форсунок вертикального ряда

$$t_{\text{в.вых}} = \frac{t_{1\text{вых}} + t_{1\text{вых}} + \mathbf{K} + t_{n\text{вых}}}{n}, \quad (15)$$

где  $n = N$  – число форсунок в вертикальном ряду, равное числу ярусов форсунок в аппарате.

6 *Определение теплопроизводительности контактного аппарата*

Зная типоразмер и общее количество форсунок, а также температуру воды на входе и выходе из аппарата, теплопроводимость контактного утилизатора определяется по формуле

$$Q = nc_{\text{рв}} G (t_{\text{в.вых}} - t_{\text{в.вх}}). \quad (16)$$

Таким образом, приведенная процедура теплового расчета рассматриваемой утилизационной установки позволяет при заданных параметрах отходящих газов и воды на её входе получить марку и количество распылителей для генерирования капель воды, произвести их компоновку в штатном коробе для отвода газов, рассчитать параметры теплоносителей на выходе из установки и определить её теплопроизводительность.

### Выводы

В результате проведённых авторами исследований [9–13] создана методика теплового расчета газокapельного контактного утилизатора теплоты низкотемпературных отходящих газов, учитывающая реальные условия протекания процессов переноса в рассматриваемой двухфазной системе.

### Список литературы

- 1 **Галустов, В. С.** Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике [Текст] / **В. С. Галустов.** – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
- 2 **Хавкин, Ю. И.** Центробежные форсунки [Текст] / **Ю. И. Хавкин.** – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 168 с.
- 3 **Терехов, В. И.** Численное исследование гидродинамики, тепло- и массообмена двухфазного газопарокапельного потока в трубе [Текст] / **В. И. Терехов, М. А. Пахомов** // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 1. – С. 108–122.
- 4 **Пахомов, М. А.** Численное исследование гидродинамики и теплообмена в пристенных и струйных газокapельных потоках [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» / Пахомов Максим Алек-

- сандрович ; Учреждение Российской академии наук Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск : ИТФ СО РАН, 2009. – 39 с.
- 5 **Мустафин, Р. Р.** Математическое моделирование процессов теплообмена двухфазных потоков в двигателях летательных аппаратов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» / **Мустафин Ренат Рафаилович** ; «Уфимский государственный авиационный технический университет». – Уфа, 2010. – 15 с.
  - 6 **Тумашова, А. В.** Моделирование процессов тепло- и массообмена в форсуночных оросительных камерах [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» / **Тумашова Анастасия Валерьевна** ; Государственное образовательное учреждение Высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет». – Томск, 2011. – 19 с.
  - 7 **Pakhomov, M. A.** Second moment closure modeling of flow, turbulence and heat transfer in droplet-laden mist flow in a vertical pipe with sudden expansion [Text] / **M. A. Pakhomov, V. I. Terekhov** // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2013. – No. 66. – P. 210-222. – ISSN 0947-7411. – doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.013.
  - 8 **Терехов, В. И.** Экспериментальное и численное исследование нестационарного испарения капель жидкости [Текст] / **В. И. Терехов, В. В. Терехов, Н. Е. Шишкин, К. Ч. Би** // Инженерно-Физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 5. – С. 829–836. – ISSN 1062-0125.
  - 9 **Безродный, М. К.** Некоторые характеристики распыла центробежных форсунок контактных утилизаторов отходящих газов капельного типа [Текст] / **М. К. Безродный, Н. Н. Голянд, П. А. Барабаш, А. Ю. Рачинский, А. Б. Голубев** // Промышленная Теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 31–38. – ISSN 0204-3602.
  - 10 **Безродный, М. К.** Влияние входных параметров распыла на тонкость распыла центробежных форсунок [Текст] / **М. К. Безродный, Н. Н. Голянд, П. А. Барабаш, А. Б. Голубев, А. Ю. Рачинский** // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 23–30. – ISSN 1813-5420.
  - 11 **Безродный, М. К.** До визначення поверхні теплообміну в контактних теплоутилізаторах крапельного типу [Текст] / **М. К. Безродний, М. Н. Голянд, А. Ю. Рачинський** // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/8(67). – С. 21–26. – ISSN 1729-3774. – doi: 10.15587/1729-4061.2014.20646.
  - 12 **Безродный, М. К.** Экспериментальное исследование коэффициентов тепло- и массообмена при утилизации теплоты парогазового потока в факеле капель механической форсунки [Текст] / **М. К. Безродный, А. Ю. Рачинский, Н. Н. Голянд, П. А. Барабаш** // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/8(78). – С. 50–59. – ISSN 1729-3774. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.55484.
  - 13 **Безродный, М. К.** Параметрические границы эффективного использования центробежной водяной форсунки в контактных утилизаторах теплоты отходящих газов [Текст] / **М. К. Безродный, А. Ю. Рачинский, П. А. Барабаш, Н. Н. Голянд** //

- Инженерно-Физический журнал. – 2016. – № 4. – ISSN 1062-0125.
- 14 **Пажи, Д. Г.** Основы техники распыливания жидкостей [Текст] / **Д. Г. Пажи, В. С. Галустов.** – М. : Химия, 1984. – 255 с.
  - 15 **Зайцев, А. И.** Основы теории процессов движения и взаимодействия дисперсных материалов в тонких слоях и разреженных потоках и разработка эффективного технологического оборудования для их осуществления [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.09 «Машины и агрегаты нефтяной и газовой промышленности» ; защищена 11.03.1979 ; утв. 161.06.1979 / **Зайцев Анатолий Иванович** ; Московского института химического машиностроения. – М., 1979. – 591с.
  - 16 **Аронов, И. З.** Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа [Текст] / **И. З. Аронов.** – Ленинград : Недра, 1990. – 280 с.
  - 17 **Безродный, М. К.** Теплообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с плёночной жидкости [Текст] / **М. К. Безродный, И. А. Назарова, С. А. Хавин** // Промышленная теплотехника. – 2003. – № 4. – С. 26–30.
  - 18 **Безродный, М. К.** Контактный теплообмен в проточном барботажном слое [Текст] / **М. К. Безродный, А. П. Костюк, Н. Н. Голияд** // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 7. – С. 53–54. – ISSN 0204-3602.
  - 19 **Богданов, С. Н.** Холодильная техника. Свойства веществ [Текст] : справ. / **С. Н. Богданов, О. П. Иванов, А. В. Куприянова.** – М. : Агропромиздат, 1985. – 208 с.
  - 6 **Tumashova, A. V.** (2011), <sup>2</sup>Modelirovanie processov teplo- i massoobmena v forsunochnyh orositel'nyh kamerah [Modelling of processes of heat and mass transfer in the washer nozzle]<sup>2</sup>, Ph.D. Thesis, , 01.04.14 "Thermophysics and theoretical the heating engineer" Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia.
  - 7 **Pakhomov, M. A. and Terekhov, V. I.** (2013), <sup>2</sup>Second moment closure modeling of flow, turbulence and heat transfer in dropletladen mist flow in a vertical pipe with sudden expansion [Second moment closure modeling of flow, turbulence and heat transfer in droplet-laden mist flow in a vertical pipe with sudden expansion]<sup>2</sup>, Int. J. of Heat and Mass Transfer, no. 66, pp. 210–222, ISSN, 0947-7411, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.013.
  - 8 **Terehov, V. I., Terehov, V. V., Shishkin, N. E. and Bi K. Ch.** (2010), <sup>2</sup>Jeksperimental'noe i chislennoe issledovaniya nestacionarnogo isparenija kapel' zhidkosti [Experimental and numerical study of non-stationary evaporation of liquid droplets]<sup>2</sup>, IFZh [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], vol. 83, no. 5, pp. 829–836, ISSN1062-0125.
  - 9 **Bezrodnyj, M. K., Golijad, N. N., Barabash, P. A., Rachinskij, A. Ju. and Golubev, A. B.** (2013), <sup>2</sup>Nekotorye harakteristiki raspyla centrobeznyh forsunok kontaktnyh utilizatorov othodjashhih gazov kapel'nogo tipa [Some spray characteristics of centrifugal atomizers for contact utilizers of the exhaust gases of the drop type]<sup>2</sup>, Promyshlennaja Teplotehnika [Industrial Heat Engineering], vol. 35, no. 6, pp. 31–38, ISSN 0204-3602.
  - 10 **Bezrodnyj, M. K., Golijad, N. N., Barabash, P. A., Golubev, A. B. and Rachinskij, A. Ju.** (2013), <sup>2</sup>Vlijanie vhodnyh parametrov vody na tonkost' raspyla centrobeznyh forsunok [Influence of input parameters of water on a thinness of spray of centrifugal atomizers]<sup>2</sup>, Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija [Power engineering: economics, technique, ecology], no. 2, pp. 23–30, ISSN 1813-5420.
  - 11 **Bezrodnyj, M. K., Golijad, M. N. and Rachinskij, A. Ju.** (2014), <sup>2</sup>Do viznachennja poverhni teplomasoobminu v kontaktnih teploutilizatorah krapel'nogo tipu [To determine heat and mass exchange surface in contact utilizers of drop type]<sup>2</sup>, Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], no. 1/8(67), pp. 21–26, ISSN1729-3774, doi: 10.15587/1729-4061.2014.20646.
  - 12 **Bezrodnyj, M. K., Rachinskij, A. Ju., Golijad, N. N. and Barabash P. A.** (2015), <sup>2</sup>Jeksperimental'noe issledovanie koeficientov teplo- i massoobmena pri utilizacii teploty parogazovogo potoka v fakele kapel' mehanicheskoj forsunki [Experimental study of heat and mass transfer coefficients at heat recovery steam-gas flow in the torch of drops of mechanical nozzle]<sup>2</sup>, Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], no. 6/8(78), pp. 50–59, ISSN1729-3774, doi:10.15587/1729-4061.2015.55484.
  - 13 **Bezrodnyj, M. K., Rachinskij, A. Ju., Barabash, P. A. and Golijad N. N.** (2016), <sup>2</sup>Parametricheskie granicy jeffektivnogo ispol'zovaniya centrobeznoj vodjanoj forsunki v kontaktnyh utilizatorah teploty othodjashhih gazov [Parametric boundaries of the effective use of
  - 1 **Galustov, V. S.** (1989), Prjamotochnye raspylitel'nye apparaty v teplojenergetike [Once-through spray devices in power system], Jenergoatomizdat, Moscow, Russia.
  - 2 **Havkin, Ju. I.** (1976), Centrobezhnye forsunki [Rotary atomizers], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
  - 3 **Terehov, V. I. and Pahomov, M. A.** (2003), <sup>2</sup>Chislennoe issledovanie gidrodinamiki, teplo- i massoobmena dvuhfaznogo gazoparokapel'nogo potoka v trube [Numerical investigation of fluid flow, heat and mass transfer gas two-phase flow in a gasstreamdrops tube]<sup>2</sup>, Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], vol. 44, no. 1, pp. 108–122.
  - 4 **Pahomov, M. A.** (2009), <sup>2</sup>Chislennoe issledovanie gidrodinamiki i teplomasoobmena v pristennyh i strujnyh gazokapel'nyh potokah [Numerical investigation of fluid flow and heat and mass transfer in the near-wall jet and gas-droplet flows]<sup>2</sup>, D. Sc. Thesis, 01.04.14 "Thermophysics and theoretical the heating engineer", Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia.
  - 5 **Mustafin, R. R.** (2010), <sup>2</sup>Matematicheskoe modelirovanie processov teplomasoobmena dvuhfaznyh potokov v dvigatel'jah letatel'nyh apparatov [Mathematical modeling of heat and mass transfer of two-phase flows in engines of aircraft]<sup>2</sup>, Ph.D. Thesis, 05.07.05 "Heat, electrorocket engines and power plants of aircraft" Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

- centrifugal water nozzles in the contact heat recovery heat of exhaust gases]<sup>2</sup>, IFZh [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], no. 4, pp. ISSN1062-0125.
- 14 **Pazhi, D. G. and Galustov, V. S.** (1984), Osnovy tehniki raspylivaniya zhidkostej [Basic techniques of atomization of liquids], Khimiya, Publ. Moscow, Russia.
- 15 **Zajcev, A. I.** (1979), Osnovy teorii protsessov dvizheniya i vzaimodeystviya dispersnykh materialov v tonkikh sloyakh i razrezhennykh potokakh i razrabotka effektivnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya ikh osushchestvleniya [Basic theory of movement processes and the interaction of disperse materials in thin layers and diluted flows and the development of efficient equipment for their implementation]<sup>2</sup>, D. Sc. Thesis, 05.04.09 Machines and equipment Oil and Gas Industry Moscow Institute of Chemical Engineering, Moscow, Russia.
- 16 **Aronov, I. Z.** (1990), Kontaktnyj nagrev vody produktami sgoraniya prirodnogo gaza [Contact water heating products of combustion of natural gas], Nedra, Leningrad, Russia.
- 17 **Bezrodnyj M. K., Nazarova, I. A. and Havin S. A.** (2003), <sup>2</sup>Teplomassoobmen pri kondensacii vodjanyh parov iz parogazovoj smesi v voshodjashhem potoke s plenкой zhidkosti [Heat and mass transfer in the condensation of water vapor from the gas mixture upstream from the liquid film]<sup>2</sup>, Promyshlennaja teplotehnika [Industrial Heat Engineering], no. 4, pp. 26–30.
- 18 **Bezrodnyj, M. K., Kostjuk, A. P. and Golijad N. N.** (2011), <sup>2</sup>Kontaktnyj teplomasoobmen v pro-tochnom barbotazhnom sloe [Contact heat and mass transfer in fluid bubbling bed]<sup>2</sup>, Promyshlennaja teplotehnika [Industrial Heat Engineering], vol. 33, no. 7, pp. 53–54, ISSN 0204-3602.
- 19 **Bogdanov, S. N., Ivanov, O. P. and Kuprijanova, A. V.** (1985), Holodil'naja tehnika. Svoystva veshhestv: Spravochnik [Refrigeration equipment. Properties of materials], Agropromizdat [Cooling technology], Moscow, Russia.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Безродный Михаил Константинович** – доктор технических наук, профессор, зам. заведующего кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; e-mail: [m.bezrodny@kpi.ua](mailto:m.bezrodny@kpi.ua), ORCID 0000-0002-0788-5011.

**Bezrodny Michail** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering, National Technical University of Ukraine <sup>2</sup>Kiev Polytechnic Institute<sup>2</sup>, Kiev, Ukraine.

**Рачинский Артур Юрьевич** – аспирант кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; e-mail: [artur\\_rachinski@mail.ru](mailto:artur_rachinski@mail.ru), ORCID 0000-0001-6622-1517.

**Rachinskiy Artur** – PhD student, Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering, National Technical University of Ukraine <sup>2</sup>Kiev Polytechnic Institute<sup>2</sup>, Kiev, Ukraine.

**Голяд Николай Никифорович** – старший преподаватель кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; e-mail: [goliad.n@mail.ru](mailto:goliad.n@mail.ru), ORCID 0000-0002-9332-9723.

**Goliyad Mykola** – Lecturer, Department Chair of Theoretical and Industrial Heat Engineering, National Technical University of Ukraine <sup>2</sup>Kiev Polytechnic Institute<sup>2</sup>, Kiev, Ukraine.

*Пожадуїста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Безродный, М. К.** Методика теплового расчёта контактного газокapельного утилизатора теплоты низкотемпературных отходящих газов [Текст] / **М. К. Безродный, А. Ю. Рачинский, Н. Н. Голяд** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 128–135. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.19.

*Please cite this article as:*

**Bezrodny, M., Rachinskiy, A. and Goliyad, N.** (2016), <sup>2</sup>Heat Calculation Technique for the Contact-Type Gas-Drop Heat Recovery System of Low-Temperature Effluent Gases<sup>2</sup>, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1181), pp. 128–135, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.19.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Безродний, М. К.** Методика теплового розрахунку контактного газокapельного утилизатора теплоты низкотемпературних відхідних газів [Текст] / **М. К. Безродний, А. Ю. Рачинський, М. Н. Голяд** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 128–135. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.19.

**АНОТАЦІЯ** Розроблено методику розрахунку контактного апарату газокapельного типу для утилізації теплоти низькотемпературних відхідних газів. Для розпилювання рідини використовувалась механічна відцентрова форсунка. Дана методика враховує реальні умови протікання процесів тепло- і масообміну в системі «конус факелу розпилення крапель рідини – суцільне парогазове середовище» і базується на використанні результатів раніше проведених авторами експериментальних досліджень в даній системі.

**Ключові слова:** методика, контактний утилізатор теплоти, газокapельний, форсунка.

*Поступила (received) 11.01.2016*