

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОДУЛЬНОГО КОНТАКТНОГО ЭЛЕМЕНТА ВЕНТУРИ

Косырев В.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Нижегородский Государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», Дзержинск, Россия (606026, Дзержинск, ГСП ул. Гайдара, 49), e-mail: [mahp@dfngtu.nnov.ru](mailto:mahp@dfngtu.nnov.ru)

Проанализированы различные варианты исполнения труб Вентури для очистки газов мокрым способом. Предпочтение отдано модульному принципу построения аппарата. Предложена конструкция модульного контактного элемента Вентури (МКЭВ). Взаимодействие между газом и жидкостью в МКЭВ весьма эффективное. По конструкции МКЭВ прост. Он состоит из стального конфузора с горловиной и диффузора из пластика. Работа МКЭВ возможна при форсуночном и пленочном способах орошения. Установлено, что при скоростях газа в горловине до 70 м/с гидравлическое сопротивление МКЭВ  $\Delta p$  при форсуночном орошении существенно выше. Таким образом, способ орошения сильно влияет на  $\Delta p$ . Показано, что пленочное орошение МКЭВ более предпочтительно. Изучены несколько вариантов МКЭВ для пленочного орошения. Лучшим вариантом является конструкция МКЭВ с тангенциальными щелями на конфузоре. Производительность одного МКЭВ по газу от 50 до 130 м<sup>3</sup>/ч. Получены экспериментальные формулы для нахождения  $\Delta p$  МКЭВ с пленочным орошением.

Ключевые слова: мокрая очистка газа, модульный контактный элемент Вентури (МКЭВ), способ орошения, конструкция МКЭВ, гидравлическое сопротивление.

## INVESTIGATION WORK OF VENTURI MODULAR CONTACT ELEMENT

Kosyrev V.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Dzerzhinsk, Russia (606026, Gaidar street, 49), e-mail: [mahp@dfngtu.nnov.ru](mailto:mahp@dfngtu.nnov.ru)

We have analyzed different modifications of Venturi tubes for gas scrubbing. Preference was given to the modular principle of apparatus construction. We suggested the structure of Venturi modular contact element (VMCE). Interaction between gas and liquid in the VMCE is very effective. The structure of the VMCE is simple. It consists of a steel confuser with a neck and a plastic diffuser. Two types of VMCE operation are possible: nozzle or film irrigation. It was established, that if the gas velocity in the neck is less than 70 m/s, the pressure loss of VMCE  $\Delta p$  with nozzle irrigation is significantly higher. Thus,  $\Delta p$  is very sensitive to the irrigation method. It was shown that the VMCE with the film irrigation is more preferable. We studied different modifications of VMCE with the film irrigation. The best structure is VMCE with tangential slots on the confuser. The VMCE gas output vary from 50 to 130 m<sup>3</sup>/h. The experimental formulas for  $\Delta p$  VMCE with the film irrigation were received.

Keywords: gas scrubbing, Venturi modular contact element (VMCE), irrigation method, structure of VMCE, pressure loss.

### Введение

Трубы Вентури первоначально были предложены в качестве устройств для измерения расхода сред, однако позднее они стали широко применяться и в качестве аппаратов для мокрой очистки газа от пыли, абсорбции и теплообмена. Широкому применению их в промышленности способствовали высокая эффективность и интенсивность работы, надежность и сравнительная простота конструкции. Необходимо отметить, что трубы Вентури (ТВ) весьма перспективны при решении экологических задач, связанных с необходимостью очистки отходящих газов. Скруббер Вентури является наиболее эффективным из применяемых в промышленности мокрых пылеуловителей [4]. Имеется опыт весьма эффективного

использования труб Вентури для очистки газов в энергетике и промышленности [2,6], в частности от тумана серной кислоты[1,6].

Классический аппарат на базе ТВ включает конфузор, горловину, диффузор и каплеуловитель одного из типов. Возможны различные способы подвода орошающей жидкости к ТВ, при этом удельный её расход может составлять от 0,15 до 3,5 л/ м<sup>3</sup> газа и более. Скорость газа в горловине  $w_r$  может меняться от 30 до 150 м/с. Благодаря высокой скорости газа и большой турбулентности потока жидкость дробится на мелкие капли, образуя развитую поверхность контакта фаз. Отсюда высокая эффективность ТВ. Платой за это является повышенное гидравлическое сопротивление ТВ.

Оптимальными с точки зрения аэродинамики являются ТВ с углом сужения конфузора 25 – 28° и с углом расширения диффузора 6 – 7° при длине горловины 0,15  $d_r$  [3]. По форме сечения горловины ТВ могут быть круглые, щелевые и кольцевые. Круглые применяются при малых расходах газа т.к. рост диаметра горловины ведет к падению эффективности работы и к значительному росту длины ТВ. Поэтому при значительных расходах газа круглые ТВ применяют в виде групповых и батарейных компоновок. Для них весьма актуальной становится проблема равномерности работы всех ТВ по газу и по жидкости. Подача жидкости к ТВ возможна путем её ввода через отверстия в горловине, путем центрального ввода в конфузор (форсуночное орошение) либо путем перелива через верхний край конфузора ТВ (плёночное орошение).

Решение проблемы равномерности работы можно обеспечить идентичностью размеров всех ТВ, одинаковым их орошением и одинаковым гидравлическим сопротивлением  $\Delta p$  всех ТВ. Указанное, в известной степени, решается применением аппаратов с модульными контактными элементами Вентури (МКЭВ). Одна из разновидностей МКЭВ разработана и испытана в ДПИ НГТУ. МКЭВ размещают на горизонтальной тарелке в корпусе вертикального аппарата. Конфузоры крепят на тарелке сверху, а диффузоры вворачивают в них на резьбе снизу. Производительность одного МКЭВ при диаметре горловины  $d_r = 22$  мм составляет 50 – 130 м<sup>3</sup>/ч. Требуемая производительность аппарата по газу обеспечивается установкой нужного количества МКЭВ идентичных по своим характеристикам.



Рисунок 1.- Стенд для изучения  
МКЭВ

Приведем пример. Комбинированный аппарат, содержащий 60 шт. МКЭВ, которые размещены с шагом 132 мм по периметрам шестиугольников, имеет производительность 3000 – 7800 м<sup>3</sup>/ч. Диаметр корпуса аппарата составляет 1400 мм, при высоте 2000 мм. МКЭВ имеет стальной конфузор с горловиной и пластмассовый диффузор, изготавливаемый методом литья под давлением. Именно конфузор и горловина являются наиболее ответственными элементами МКЭВ, отвечающими за равномерность его работы.

Возможны несколько вариантов выполнения конфузоров и их орошения. Необходимо выбрать лучший. Нет ясности в вопросе о влиянии способа орошения на гидравлическое сопротивление ТВ. Так, согласно [3]  $\Delta p$  определяется по одной формуле и при центральном и при пленочном орошении.

То есть, способ орошения не влияет на  $\Delta p$ . В случае МКЭВ по опытам это не соответствует действительности, что представляется серьезным пробелом, т.к. в настоящее время расчет эффективности скрубберов Вентури наиболее часто выполняют именно на основе энергетического метода расчета [5], для использования которого необходимо знать  $\Delta p$ .

**Цель исследования** - выбор способа орошения, отработка конструкции МКЭВ, изучение его работы, определение гидравлического сопротивления МКЭВ  $\Delta p$  и нахождение зависимостей для расчета  $\Delta p$  при различных нагрузках по газу и жидкости.

**Методы исследования и аппаратура.** Опыты по изучению МКЭВ проводили на экспериментальном стенде, который показан на рисунке 1. Стенд содержит аппарат из царг внутренним диаметром 200 мм, бак для жидкости, центробежный насос и вентилятор. Между царг аппарата из оргстекла зажата тарелка, на которой установлен исследуемый МКЭВ.

Опытный МКЭВ состоит из двух частей: стального конфузора с углом сужения 28° и диффузора с углом расширения 8°. Диаметр горловин  $d_f = 22$  мм. Диаметр МКЭВ снаружи 92 мм, внутри – 82 мм, высота 490 мм. Конфузор закреплен на стальной тарелке, а диффузор ввинчен в конфузор на резьбе М40. Распределительная обечайка с отверстиями служит для обеспечения равномерного подвода жидкости к конфузору МКЭВ. Расход газа определяли по перепаду давления на сдвоенной диафрагме, а расход жидкости – ротаметром. Аппарат

работал под разряжением – вентилятор подключен к нижней части аппарата после каплеуловителя, а диафрагма установлена на прямом участке на входе в аппарат. В качестве каплеуловителя использована насадка из керамических колец Рашига 25×25.

Первая серия экспериментов была выполнена без орошения. Далее эксперименты выполняли в виде серий, где расход воды был постоянным, а расход газа меняли. В ходе экспериментов скорость газа в горловине МКЭВ  $w_r$  меняли от 30 до 96 м/с, расход воды  $L$  меняли от 0,08 до 0,33 м<sup>3</sup>/ч. Подачу воды к МКЭВ производили по варианту форсуночного или пленочного орошения. Первое вели центробежными форсунками с диаметром сопла  $d_0= 2$  и 4 мм. При пленочном орошении изучали конфузоры трех видов: А – с гладкой верхней кромкой, Б – с шестью радиальными щелями по верхней кромке (орошение радиальное) и В – с 12 тангенциальными щелями (орошение тангенциальное). Для Б и В высота щелей - 15 мм, а ширина составляла 10 и 4 мм соответственно. Вели наблюдение за характером работы и дифманометрами измеряли сопротивление аппарата и МКЭВ  $\Delta p$ .

**Результаты исследования.** В ходе изучения гидравлического сопротивления сухого МКЭВ было установлено, что оно пропорционально  $w_r^2$ . При максимальной скорости в горловине  $w_r= 108$  м/с сопротивление МКЭВ  $\Delta p_r$  составило 940 Па.

Наблюдение за работой аппарата с орошением показало следующее. Работа МКЭВ с подачей воды в конфузоре форсунками устойчивая, включая и конфузоре А. Было несколько случаев забивки форсунок. Отметим, что установка форсунки над каждым МКЭВ проблематична. Кроме того, подвод жидкости форсунками требует дополнительных затрат энергии. При пленочном орошении с конфузоре А наблюдалась значительная неустойчивость работы из-за скачков  $\Delta p$ . По-видимому, здесь сказывается малый диаметр  $d_0$  МКЭВ, при котором накатившаяся сверху порция жидкости практически целиком перекрывает сечение горловины, вызывая резкий рост  $\Delta p$ . Кроме того конфузоре вида А в многотрубном аппарате не обеспечат равномерную подачу жидкости ко всем МКЭВ. Поэтому конфузоре А для использования с пленочным орошением нежелательны. При работе МКЭВ с пленочным орошением конфузоров Б и В наблюдалась близкая картина. Аппарат работал устойчиво при этом конфузоре В обеспечивал сплошную пленку жидкости и наилучшие условия орошения МКЭВ. Это имело место и при максимальном расходе орошения  $L= 0,330$  м<sup>3</sup> /ч. Здесь сопротивление МКЭВ  $\Delta p$  при  $w_r= 36,8$  и 78,9 м/с составляло соответственно 1010 и 4513 Па. Каплеуловитель работал надежно при всех нагрузках по газу и жидкости. Гидравлическое сопротивление его было невелико.

Зависимости сопротивления МКЭВ от скорости газа в горловине при подаче воды  $L = 0,142$  и  $0,185 \text{ м}^3/\text{ч}$  при различных вариантах орошения показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

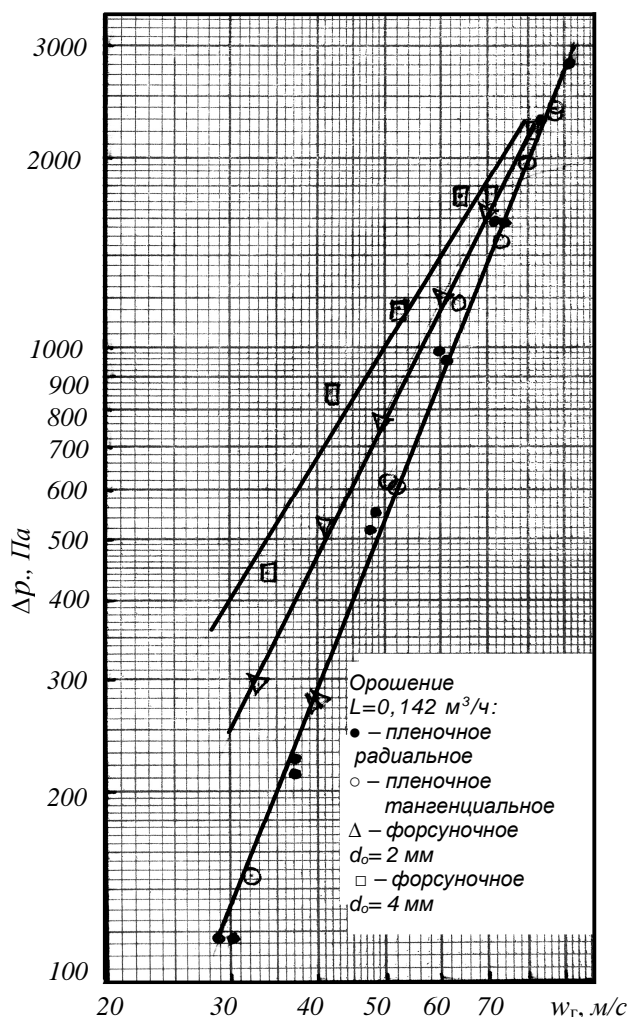


Рисунок 2.- Зависимость гидравлического сопротивления МКЭВ  $\Delta p$  от скорости газа в горловине  $w_g$  при расходе воды  $L=0,142 \text{ м}^3/\text{ч}$

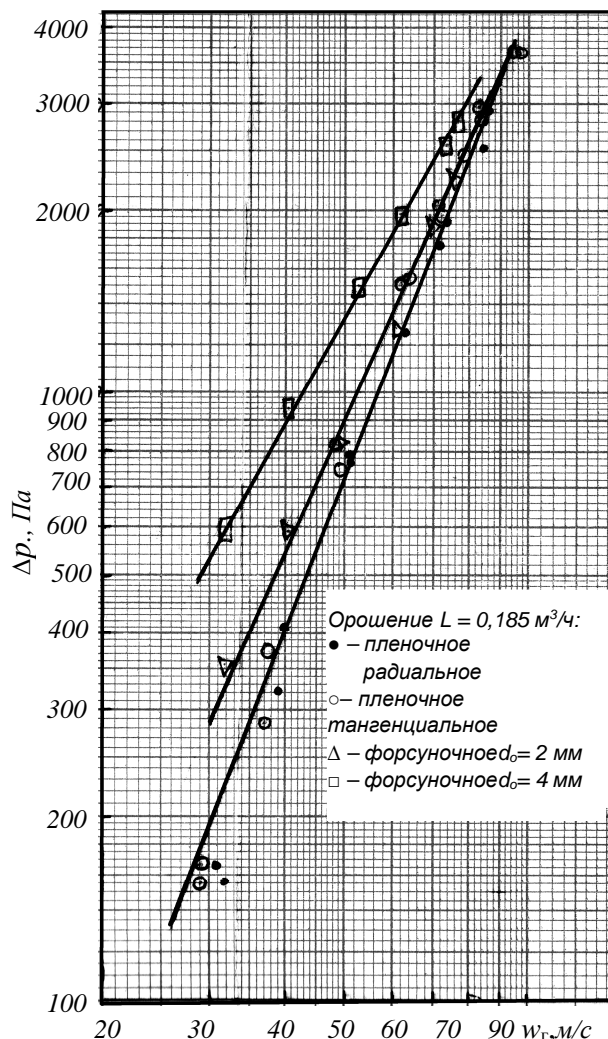


Рисунок 3.- Зависимость гидравлического сопротивления МКЭВ  $\Delta p$  от скорости газа в горловине  $w_g$  при расходе воды  $L=0,185 \text{ м}^3/\text{ч}$

Из рисунков 2 и 3 видно, что при увеличении скорости газа  $w_g$  с пленочным орошением  $\Delta p$  растет быстрее чем при форсуночном. При скоростях газа менее  $70 \text{ м/с}$  форсуночное орошение характеризуется заметно большим сопротивлением  $\Delta p$ . При скоростях газа выше  $70 - 80 \text{ м/с}$  различие по  $\Delta p$  сглаживается. Величина сопротивления при пленочном орошении практически одинакова для радиальных и тангенциальных щелей в конфузоре. Величина сопротивления МКЭВ при форсуночном орошении зависит от диаметра сопла. При большем диаметре сопла сопротивление ощутимо выше.

Зависимость сопротивления МКЭВ от скорости газа при подаче воды  $L = 0,0784$  и  $0,142$  м<sup>3</sup>/ч для радиального и тангенциального плёночного орошения показана на рисунке 4. Видно, что при увеличении количества орошения растёт и сопротивление МКЭВ  $\Delta p$ . Скорость газа влияет на сопротивление МКЭВ, в большей степени чем в случае сухого элемента. Здесь  $\Delta p$  пропорционально  $w_{г}$  в степени 2,8–2,9. Однако, по мере роста количества орошения влияние скорости газа на  $\Delta p$  понижается. Так при подаче воды  $L = 0,264$  и  $0,330$  м<sup>3</sup>/ч степень влияния уже 2,12 и 1,75 соответственно.

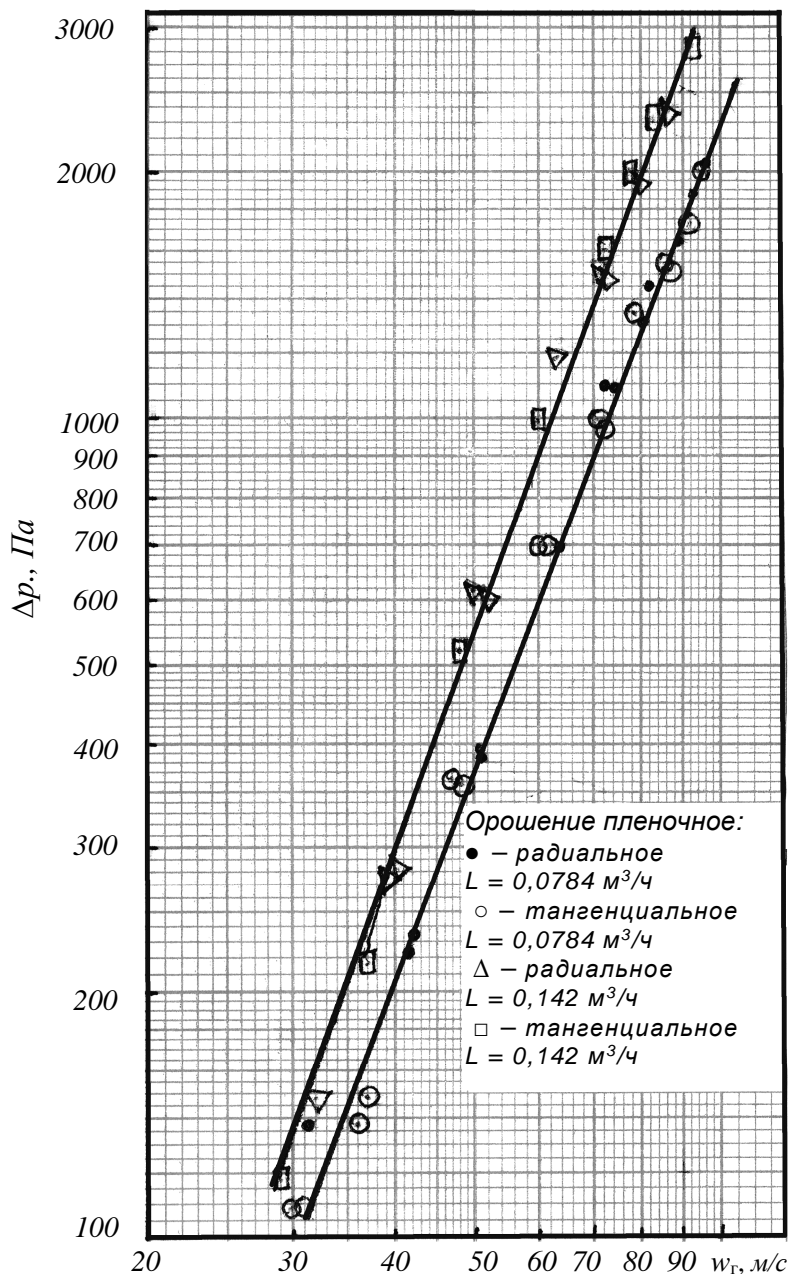


Рисунок 4.- Зависимость сопротивления МКЭВ  $\Delta p$  от скорости газа в горловине  $w_{г}$  для плёночного орошения при расходе воды  $L = 0,0784$  и  $0,142$  м<sup>3</sup>/ч.

Представляется, что наиболее перспективной конструкцией МКЭВ является вариант с пленочным орошением и с конфузуром, имеющим тангенциальные щели. Для нахождения гидравлического сопротивления таких МКЭВ может быть использована известная для ТВ формула [5]:

$$\Delta p = \Delta p_{\Gamma} + \Delta p_{\text{ж}}, \quad (1)$$

где  $\Delta p_{\Gamma}$  - гидравлическое сопротивление сухого МКЭВ, Па;

$\Delta p_{\text{ж}}$  - гидравлическое сопротивление МКЭВ, обусловленное вводом жидкости, Па.

Здесь гидравлическое сопротивление  $\Delta p_{\Gamma}$  можно рассчитать по формуле:

$$\Delta p_{\Gamma} = \xi_{\text{сух}} w_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma} / 2, \quad (2)$$

где  $\xi_{\text{сух}}$  - коэффициент гидравлического сопротивления сухого элемента;

$w_{\Gamma}$  - скорость газа в горловине, м/с;

$\rho_{\Gamma}$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Формула (2) хорошо описывает, полученные нами экспериментальные данные при  $\xi_{\text{сух}} = 0,132$ , что согласуется с данными [5], согласно которым  $\xi_{\text{сух}} = 0,12 - 0,15$ .

Гидравлическое сопротивление  $\Delta p_{\text{ж}}$  можно рассчитать по формуле:

$$\Delta p_{\text{ж}} = \xi_{\text{ж}} \frac{w_{\Gamma}^2 \rho_{\text{ж}}}{2} m, \quad (3)$$

где  $\xi_{\text{ж}}$  - коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий ввод в МКЭВ орошающей жидкости;

$m$  - удельный расход орошающей жидкости, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ж}}$  - плотность орошающей жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Для нахождения  $\xi_{\text{ж}}$  по методу наименьших квадратов была получена формула:

$$\xi_{\text{ж}} = 8,657 \cdot 10^{-12} \xi_{\text{сух}} \cdot W_{\text{ж}}^{2,546} \left[ \left( \frac{W_{\text{ж}}}{W_{\Gamma}} \right) \left( \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right) \right]^{-2,215}, \quad (4)$$

где  $W_{\text{ж}}$  - массовая скорость жидкости в горловине, кг/м<sup>2</sup>·с;

$W_{\Gamma}$  - массовая скорость газа в горловине, кг/м<sup>2</sup>·с.

При нахождении зависимости для  $\xi_{\text{ж}}$  были использованы данные по сопротивлению при пленочном тангенциальном орошении конфузур МКЭВ при пяти расходах воды  $L$  от 0,0784 до 0,192 м<sup>3</sup>/ч.

Расчет по формуле (4) позволяет получить хорошее совпадение с данными эксперимента (в пределах 12%) при скорости в горловине  $w_{\Gamma}$  от 30 до 95 м/с при удельном орошении  $m$  от  $0,57 \cdot 10^{-3}$  до  $4,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

**Заключение.** Установлено, что способ орошения влияет на гидравлическое сопротивление МКЭВ: при форсуночном оно выше чем при пленочном. Более перспективным, по нашему мнению, является пленочное орошение, т.к. оно проще по реализации, требует

меньших затрат энергии и позволяет работать с загрязненными средами. Обязательным для конфузора при пленочном орошении является наличие щелей. При пленочном орошении конфузоров без щелей работа МКЭВ крайне неустойчива. Наилучшую подачу жидкости в МКЭВ обеспечивают конфузоры с тангенциальными щелями. Для таких МКЭВ получены зависимости, позволяющие рассчитать их гидравлическое сопротивление. Изученная конструкция МКЭВ проста и технологична в изготовлении, удобна при реализации модульного принципа построения аппарата.

### Список литературы

1. Косырев В.М., Сидягин А.А., Живайкин Л.Я. Опыт внедрения установки для очистки абгазов от тумана серной кислоты //Проблемы промышленной экологии и комплексная утилизация отходов производства: тезисы докл. Междунар. научно-практич. конф.(Витебск, 3-4 окт. 1995.).- Витебск,1995.- С.76.
2. Кропп Л.И., Акбрут А.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях.- М.: Энергия, 1977.- 160 с.
3. Справочник по пыле-золоулавливанию/ Под общ.ред. А.А.Русанова, 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
4. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. и др. Очистка промышленных газов от пыли.- М.: Химия, 1981. – 392 с.
5. Швыдкий В.С, Ладыгичев М.Г. Очистка газов: Справочное издание.- М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
6. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ. – М.: Химия, 1981.- 616 с.

### Рецензенты:

Ксандров Н.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ТНВ ФГБОУ ВПО НГТУ, г.Дзержинск.

Ким П.П., д.т.н., профессор кафедры ПАХПТ ФГБОУ ВПО НГТУ, г.Дзержинск.