



УДК 669.015

**А.И. Ерёмкин** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции

**Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**

**М.Г. Зиганшин** – кандидат технических наук, доцент

Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЦЕНКИ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ

### АННОТАЦИЯ

Разработаны методика и параметры, позволяющие проводить более достоверную оценку санитарно-гигиенического совершенства и энергоэкологической эффективности систем очистки. Получен безразмерный временной параметр ухудшения качества атмосферы вследствие выброса загрязнителя очистным сооружением, который в сочетании со степенью очистки может быть использован для характеристики санитарно-гигиенического, экологического и технического совершенства газоочистных систем. Составлен конкретизированный энергоэкологический параметр с целью определения эффективности систем очистки выбросов по парниковым газам. Он определяется из сопоставления энергозатрат, необходимых для удаления  $CO_2$  из состава исследуемых выбросов и некоторых эталонных газов до идеальной концентрации, соответствующей среднему фоновому содержанию в незагрязненной атмосфере. В результате расчета однозначно оценивается степень энергоэкологичности *EER* и энергоэкологической эффективности *EEE* рассматриваемого очистного устройства. Энергоэкологическая эффективность может служить критерием выбора способов газоочистки для конкретных типов производственных выбросов. Это будет способствовать систематизации и созданию газоочистных систем, отвечающих требованиям современной экологической ситуации.

**A.I. Eremkin** – doctor of technical sciences, professor, head of the department  
Heating and Ventilation department

**Penza State University of Architecture and Building (PSUAB)**

**M.G. Ziganshin** – candidate of technical sciences, assistant professor

Heating and Ventilation department

**Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**

## THE IMPROVEMENT OF AN ESTIMATION OF SANITARY AND HYGIENIC, ENERGY AND ECOLOGICAL EFFICIENCY OF CLEARING SYSTEMS

### ABSTRACT

The developed technique and parameters allow to spend more reliable estimation of Sanitary and Hygienic perfection, and Energy and Ecological efficiency of clearing systems. The dimensionless timely parameter of atmosphere deterioration owing to emission pollutant by a clearing construction is received. This parameter in a combination with a degree of clearing can be used for determination of sanitary-and-hygienic, ecological and technical perfection systems. The concretized Energy and Ecological parameter aiming to define of an efficiency of clearing systems of emissions on hotbed gases is defined by the comparison of the power inputs necessary for removal of  $CO_2$  from the structure of investigated emissions and some reference gases up to ideal concentration, corresponding the average background maintenance in not polluted atmosphere. As a result of calculation the Energy and Ecological Ratio *EER*, and Energy and Ecological efficiency *EEE* of the considered clearing device are unequivocally estimated. Energy and Ecological efficiency can serve as a criterion of chosen way of gas purification for concrete types of industrial emissions. This will promote ordering and conduction of the gas purification systems which meet the requirements of a modern ecological situation.

Разработаны методика и параметры, позволяющие проводить более достоверную оценку санитарно-гигиенического совершенства и энергоэкологической эффективности систем очистки. Эти вопросы

рассматривались в работах многих авторов. Анализ предлагаемых характеристик по санитарно-гигиенической оценке показал, что они не всегда удобны для использования вследствие сложности,



недостаточной универсальности и т.п. В работах [1, 2, 3] отмечается отсутствие оптимального показателя оценки санитарной эффективности очистных систем. Г.П. Беспамятновым, Ю. А. Кротовым [4] предложен комплексный показатель «санитарной эффективности СЭ», который принят в нашей работе за аналог:

$$СЭ = (1 - C_e / C_b) (ПДК / C_e), \quad (1)$$

где  $C_b, C_e$  – начальная и конечная концентрации загрязнителя, мг/м<sup>3</sup>.

Он составлен как произведение степени очистки  $\eta = 1 - C_e / C_b$  и показателя «контроля биосферы»  $КБ = ПДК / C_e$ .

К настоящему времени показатель санитарной эффективности работы систем газоочистки в представленном виде широкого применения не нашел. Его неудобство в том, что численное значение показателя «КБ», как правило, на 2-3 порядка меньше, чем  $\eta$ , а «КБ» разных загрязнителей одного выброса отличается на несколько порядков. Поэтому в комплексе «СЭ» становится незаметным различие очистных устройств по степени очистки  $\eta$ , а также еще больше усложняется оценка эффективности очистки выбросов с несколькими загрязнителями. Предлагаемые для этого случая рекомендации рассчитывать СЭ отдельно для каждого соединения, а затем оценивать эффективность обезвреживания по наименьшему полученному значению, вследствие большого числа возможных сочетаний концентраций ингредиентов и параметров обезвреживания загрязнителей, во многих случаях могут оказаться неприменимыми.

Недостатком показателя «СЭ» является также некоторая несогласованность. Представим его как

$$СЭ = (1 - C_e / C_b) (ПДК \times W / ПДВ), \quad (2)$$

где  $W$  – интенсивность выброса, м<sup>3</sup>/с.

Согласно [4], СЭ растет пропорционально интенсивности выброса, что позволяет увеличивать его, не совершенствуя очистное устройство: при разбавлении выброса чистым воздухом увеличивается  $W$  и уменьшается  $C_e$ .

В комплексном показателе было бы полезно отразить экологическую составляющую совершенства аппаратов газоочистки, учитывающую ухудшение качества атмосферы. Выброс загрязнителя очистным сооружением сопровождается ущербом в виде потери ее чистоты, на восстановление которой требуется затрата определенного количества энергетических и материальных ресурсов.

С учетом рекомендаций [5] по периоду осреднения концентраций загрязнителей получен безразмерный временной параметр ухудшения качества атмосферы вследствие выброса загрязнителя очистным сооружением, который в сочетании со степенью

очистки может быть использован для характеристики санитарно-гигиенического, экологического и технического совершенства газоочистных систем:

$$\eta = (1 - C_e / C_b) T_1 = (1 - C_e / C_b) T_2 \times ПДК / C_e, \quad (3)$$

где  $C_b, C_e$  – начальная и конечная концентрации загрязнителя, мг/м<sup>3</sup>;

$T_1 = \tau_1 / \tau_0$ ;  $T_2 = \tau_2 / \tau_0$  – характерные безразмерные временные параметры;

$\tau_0$  – период осреднения концентраций загрязнителей, равный времени отбора проб при контроле ПДК<sub>мр</sub>, с;

$\tau_1$  – время заполнения, с, загрязнителем области объемом  $V$ , м<sup>3</sup>, до значения ПДК<sub>мр</sub> при ПДВ;

$\tau_2$  – время заполнения объема  $V$ , м<sup>3</sup>, выбросом интенсивностью  $W$ , м<sup>3</sup>/с.

Разработанный комплекс отличается от «СЭ» тем, что дополнительно учитывает параметр  $T_2$ . Следовательно, повышение интенсивности выброса  $W$  сокращает значение  $T_2$  и снижает величину эффективности очистной установки  $\eta$ , что не имело места в показателе «СЭ». Ввиду того, что  $T_2$  по величине имеет 3-4 порядок,  $T_1$  сравнивается по порядку величины со степенью очистки. Этим устраняется еще один недостаток комплекса «СЭ», заключающийся в нивелировании различия очистных устройств по степени очистки.

Энергоэкологический показатель рассматривается в работе А.Л. Шкаровского [6] применительно к состоянию окружающей среды в глобальных масштабах. В данном исследовании подобный показатель конкретизируется с целью определения эффективности конкретных систем очистной обработки воздуха и вентиляционных выбросов по парниковым газам.

После подписания Россией Киотского протокола он вступил в силу, и выполнение некоторых обязательств по нему должно было начаться еще в 2005 году. В частности, протокол предусматривает постепенную замену существующего очистного оборудования на более совершенное с точки зрения выброса «парниковых» газов.

Однако на территории России механизм действия Киотского протокола пока не запущен. Одна из причин имеет организационный характер и заключается в отсутствии регулирующих законодательных документов, другая – в отсутствии объективных критериев оценки совершенства очистных устройств при наличии в выбросах «парниковых» газов. Разработка и регулирующих документов, и более совершенного с точки зрения выброса «парниковых» газов очистного оборудования, должны базироваться на теоретически обоснованных показателях, которые позволили бы исключить произвол и обеспечить единый подход к оценке различных типов систем по «парниковым» газам. При этом методика оценки должна быть по возможности простой, иметь



прозрачный алгоритм вычислений с ясными, однозначными и легко определяемыми параметрами. В данной работе в качестве оптимальной количественной характеристики энергоэкологического совершенства системы по парниковым газам предлагается показатель безразмерной затраты энергии на гипотетическое удаление  $CO_2$  после очистных устройств.

Он определяется из сопоставления энергозатрат, необходимых для удаления  $CO_2$  и  $H_2O$  из состава исследуемых выбросов и некоторых эталонных газов до идеальной концентрации, соответствующей среднему фоновому содержанию в незагрязненной атмосфере  $CO_2$  (порядка 0,03% об.).

Это обеспечивает однозначность оценки рассматриваемого очистного устройства посредством сравнения энергозатрат, т.е. выявления в результате расчета степени его энергоэкологичности  $EER$  и энергоэкологической эффективности  $EEE$ .

Степень энергоэкологичности  $i$  – го очистного устройства определяется как

$$EER_i = 1 - \frac{\eta Q_i (E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn})}{39057,4 E_a} \quad (4)$$

где  $Q_p$ ,  $\eta$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>, и КПД использования его энергии при обеспечении энергозатрат на гипотетическое удаление  $CO_2$  и сопутствующие процессы;

$E_a$  – суммарная энергозатрата на удаление водяных паров и диоксида углерода из заданного состава и количества выбросов, кВт.

$$E_a = E_a^q + E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn} \text{ кВт.} \quad (5)$$

где  $E_a^q, E_{aH_2O}^{dn}, E_{aCO_2}^{dn}$  – энергозатраты на охлаждение выбросов, конденсацию водяных паров и диоксида углерода, кВт.

Однако типовые методики конструктивных и поверочных расчетов конденсаторов использовать для определения величины  $E_a$  и ее составляющих  $E_a^q, E_{aH_2O}^{dn}, E_{aCO_2}^{dn}$  невозможно. Определение геометрических размеров и температурных режимов теплоносителей теплообменника, в котором предполагается обработка смеси неконденсирующихся газов и конденсирующихся паров, имеет ряд существенных особенностей. Основное отличие в том, что с уменьшением концентрации конденсируемого компонента снижается давление насыщенных паров и температура конденсации, тогда как в типовых методиках температура конденсации предполагается постоянной.

Особенность составляет также и то, что температура поступающего на конденсационную обработку воздуха, как правило, соответствует перегретому

состоянию паров конденсируемых компонентов. Разработана и предложена схема расчета конденсаторов для очистной обработки приточного или отработанного воздуха с целью удаления парообразных конденсируемых компонентов. Процесс делится на две стадии: охлаждение газового потока без конденсации от заданной температуры  $t_a$  до температуры начала конденсации  $t_b$ , и последующее охлаждение с конденсацией до температуры  $t_e$ . В отличие от типовой методики необходимо найти промежуточную температуру теплоносителя  $t_{be}$  в соответствии с величинами  $Q_I$  и  $Q_{II}$  (рис.) – количеством тепла, Вт, отводимым на первой и второй стадиях:

$$Q_I = \sum_{g=1}^n W_{ga} c_{pa} + \sum_{i=1}^N \dot{A} W_{gi} c_{pi} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} (t_a - t_b); \quad (6)$$

$$Q_{II} = \sum_{g=1}^n W_{ga} c_{pa} + \sum_{i=1}^N \dot{A} W_{gi} c_{pi} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} (t_b - t_e) + \sum_{i=1}^N \dot{A} W_{gi} I_i^{ev} \vartheta_i, \quad (7)$$

где  $c_{pa}, c_{pi}$  – средние теплоемкости, Дж/(кг.К), воздуха (или неконденсирующейся части отбросных газов) и паров конденсируемых компонентов;  $I_i^{ev}$  – средняя энтальпия конденсации  $i$ -го компонента паров конденсируемых компонентов, Дж/кг;  $\vartheta_i$  – глубина извлечения  $i$ -го компонента конденсируемых компонентов (в долях);  $N$  – число конденсируемых компонентов.

По значению  $t_{be}$  определяются среднелогарифмические температурные напор  $\Delta t_{ml}$ ,  $\Delta t_{ml}$  на первой и второй стадиях обработки выбросов, и затем – предварительные значения начальных  $t_b^{wl}$  и конечных  $t_e^{wl}$  температур поверхности теплообмена со стороны конденсируемых компонентов.

Затем с ориентировочными значениями коэффициентов теплопередачи на первой ( $K_I$ ) и второй ( $K_{II}$ ) стадиях обработки определяются в первом приближении величины площадей теплообмена  $f_I$  и  $f_{II}$ :

$$f_{I(II)} = Q_{I(II)} / K_{I(II)} \Delta t_{ml(II)}, \text{ м}^2; \quad (8)$$

Дальнейшая схема решения задачи зависит от их соотношения. При высоком содержании паров конденсируемых компонентов в газовых выбросах  $f_I/f_{II} < 0,1$ , и подбор типоразмера конденсатора производится по суммарной площади теплообмена  $f_I + f_{II}$  с использованием типовой методики расчета конденсаторов чистого пара и поправкой на присутствие неконденсирующихся газов. При невысоком содержании паров конденсируемых компонентов в газовых выбросах и  $f_{II}/f_I < 0,1$  типоразмер

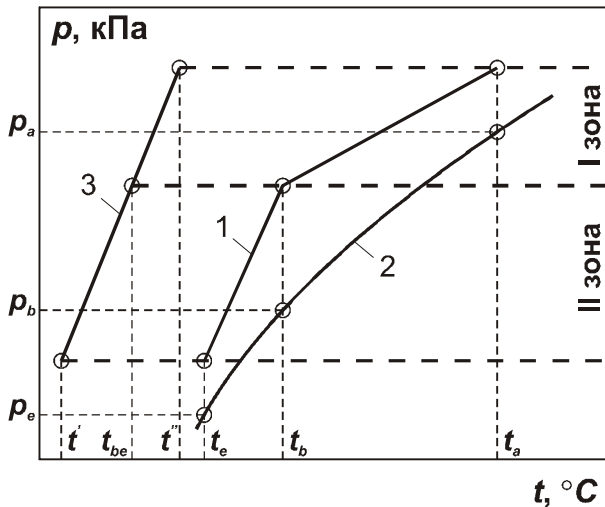


Рис. Изменение температуры и давлений насыщенных паров конденсируемых компонентов выбросов в характерных зонах конденсатора: I – охлаждение без конденсации; II – конденсация в аппарате.

1 – температура выбросов, 2 – давление насыщенных паров конденсируемого компонента, 3 – температура хладонносителя

конденсатора также подбирают по суммарной площади теплообмена, а дальнейший расчет может выполняться по типовой методике для воздухонагревателей (охладителей) поверхностного типа без учета процесса конденсации.

Если площади  $f_I$  и  $f_{II}$  сопоставимы, принимается модель двухступенчатой обработки с автономным расчетом каждой ступени теплообменника. В расчете ступени конденсационной обработки существенны следующие особенности.

Коэффициент теплопередачи  $\alpha_2$  через пленку конденсата к наружной поверхности трубы можно определять по уравнению Нуссельта. Для случая конденсации смеси паров конденсируемых компонентов уравнение Нуссельта в форме, учитывающей количество труб в пучках  $n$  и интенсификацию теплообмена при волнообразовании в ламинарно текущей пленке конденсата (по [7]), необходимо представить в виде:

$$\alpha_2 = C \lambda_{mx} \sqrt[3]{\rho_{mx}^2 n l / \xi \eta_{mx} \sum_{i=1}^N \dot{a}_i \vartheta_i W_{gi} \frac{\ddot{o}}{\theta}} \text{ Вт/(м}^2\text{К)}, \quad (9)$$

где  $C$  – коэффициент,  $l$  – определяющий размер, м,  $n$  – число труб конденсатора.

В ней физические параметры образовавшейся жидкой смеси  $\rho_{mx}$ , кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{mx}$ , Вт/(м·К),  $\eta_{mx}$ , Па·с могут быть определены по средней температуре пленки конденсата, т.к. эмпирическая информация о параметрах большинства сочетаний  $N$  сконденсировавшихся компонентов отсутствует.

При увязке значения теплового потока

учитывается следующее. Так как начальная и конечная температуры поверхности конденсации жестко связаны с заданными значениями концентраций конденсируемых компонентов на входе и выходе, необходимо варьировать температурой хладонносителя и стенки.

Температурный напор  $\Delta t_{mII}$  уточняется с учетом увязки тепловых потоков (п.8). После подсчета величины теплового потока от пленки конденсата к хладонносителю

$$q = k \Delta t_{mII}, \text{ Вт/м}^2, \quad (10)$$

вновь производится увязка значения теплового потока и определяется суммарный коэффициент теплопередачи для конденсационной стадии обработки.

Данная методика обеспечивает точность определения параметров конденсатора, достаточную для практического применения. Схема была верифицирована по расчетам процесса конденсации паров растворителей ПО «ТАСМА» (г. Казань). Поэтому она позволяет достичь однозначности и при определении энергозатрат на гипотетическую конденсацию «парниковых газов».

Разработанный для оценки очистных устройств по «парниковым газам» безразмерный параметр **EER** основан на энергетических показателях, характеризующих минимальные энергозатраты, которые могут потребоваться при необходимости конденсационного удаления  $CO_2$  из выбросов. Они сопоставляются с совершенным устройством, в выбросах которого концентрация  $CO_2$  не превышает фоновую (характерной для незагрязненной атмосферы). Поэтому параметр **EER** может быть использован в качестве универсального критерия оценки экологического совершенства газоочистных систем с точки зрения предотвращения загрязнения атмосферы «парниковыми» газами. Энергоэкологическая эффективность, определяемая как  $EER_i = 1 - (EER_i / EER_j)$ , может также служить критерием выбора способов газоочистки для конкретных типов производственных выбросов. Это будет способствовать систематизации газоочистных систем, отбору наиболее оптимальных путей их совершенствования, созданию конструкций аппаратов и схем очистки, отвечающих требованиям современной экологической ситуации.

**Литература**

1. Торочешников Н.С., Родионов А.К., Кольцов Н.В., Клушин В.Н. Техника защиты окружающей среды. – М.: Химия, 1981. – 368 с.
2. Кузнецов И.Е., Троицкая Т.М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий. – М.: Химия, 1979. – 344 с.
3. Коузов П.А., Малыгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
4. Беспамятнов Г.П., Кротов Ю. А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. — Л.: Химия, 1985. – 528 с.
5. Еремкин А.И., Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу: Уч. пособие. – М.: Изд. АСВ, 2000. – 176 с.
6. Шкаровский А.Л. Повышение эффективности защиты воздушного бассейна при сжигании газообразного и жидкого топлива. Автореф. дисс... д.т.н. – СПб., 1997. – 48 с.
7. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю.И. Дыгнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.