

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП СРАВНЕНИЯ СИСТЕМ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

М.И. Шиляев, А.М. Шиляев

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

E-mail: shilyaev@mail.tomsknet.ru

В работе получено математическое выражение обобщенного принципа сравнения пылеулавливающих систем по удельным энергозатратам на очистку газов и проведен его анализ на конкретных примерах.

В связи с огромными объемами очищаемых газов в промышленности, а также удорожанием энергоносителей и повышением в перспективе доли использования угля в мировом топливно-энергетическом балансе вопросы экономики очистки газов становятся в настоящее время более актуальными, чем прежде. Ведущие специалисты в области газоочистки, как отечественные, так и зарубежные, не обошли эту проблему и отразили ее в той или иной степени в известной литературе [1-8]. Однако анализ состояния вопроса экономики пылеулавливающих установок, проведенный по этим источникам в [9], показал, что приводимые в них показатели пылеуловителей по удельным энергозатратам на очистку газов не могут нести в себе никакой объективной сравнительной информации, поскольку представляются при разных исходных условиях. Между тем, в [2] сделано замечание, что сопоставление удельных энергозатрат на очистку газов в сравниваемых аппаратах должно проводиться при равных эффективностях улавливания пыли с одинаковыми характеристиками дисперсности и физическими параметрами. В [8] обращено внимание на то, что основным вкладом в стоимость очистки газов являются расходы на электроэнергию, потребляемую вентиляторами на прокачку газов через аппараты, т.е. на преодоление их аэродинамических сопротивлений, которые достигают 90% общих затрат. С учетом этого обстоятельства в [8] такое сопоставление было реализовано для циклонов НИИОГАЗ на отдельных эмпирических данных. Эти же сведения позднее приводятся в монографии [4]. При этом какой-либо математической формулировки принципа сравнения пылеулавливающего оборудования, в основу которой были бы положены вышеупомянутые объективные условия сопоставления, до работ [9-12] предложено не было.

В [12] впервые найдено математическое выражение принципа в частном случае в виде отношения перепадов давления на сравниваемых аппаратах, или, что одно и то же, удельных энергозатрат на очистку единицы объема газа в них с одинаковой эффективностью, в зависимости от параметров аппаратов, ограниченных условиями сопоставления. В этом случае математическое выражение принципа оказалось независимым от параметров пыли и очищаемого газа, что является весьма удобным для его последующего анализа и использования в инженерной практике. В [10, 11] дана более общая формулировка этого принципа, позволяющая сравнивать каскады последовательно установленных пылеуловителей одного типа с единичным высокоэффективным аппаратом произвольного типа. Математическое выражение принципа для этого случая уже оказывается связанным с параметрами пыли и очищаемого газа. При его выводе был принят логарифмически нормальный закон распределения частиц по размерам (ЛНР). Проверка принципа проведена на эмпирическом материале для противоточных циклонов

НИИОГАЗ [8] и для прямооточных циклонов, полученном авторами, и приводится в упомянутых выше работах, а также в [13].

Кроме рассмотренных вариантов практический интерес представляет математическое выражение принципа сравнения пылеулавливающих систем по удельным энергозатратам на очистку газов и в более общем виде, который обеспечивал бы возможность сопоставления каскадов аппаратов, соединенных последовательно, с группой аппаратов, устанавливаемых параллельно, при любом распределении частиц пыли по размерам. Этому вопросу посвящена настоящая работа.

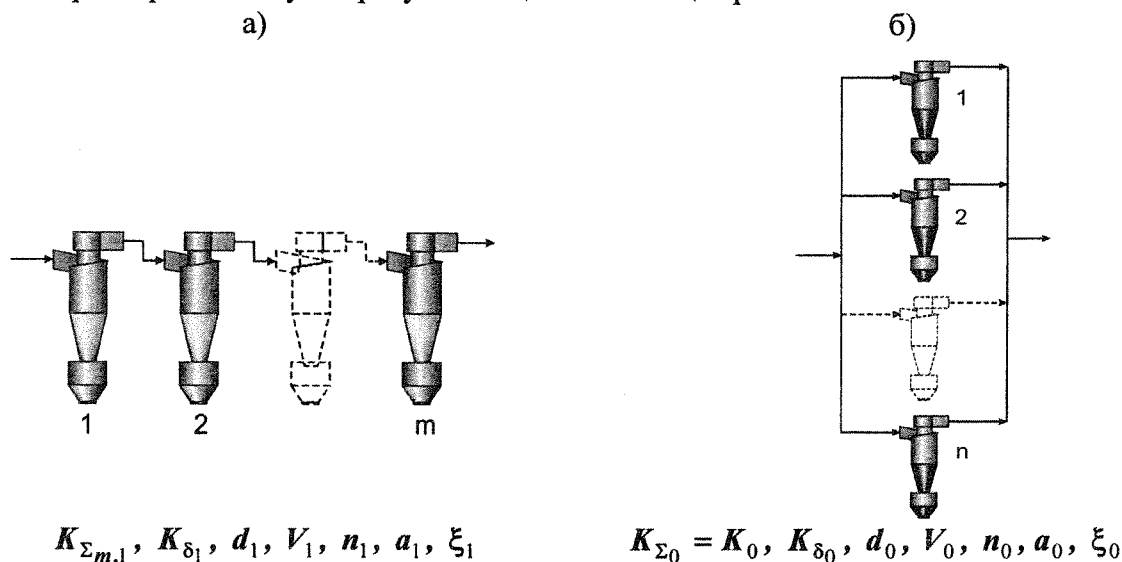


Рис. 1. Схемы двух сравниваемых пылеулавливающих систем: каскада m последовательно соединенных аппаратов (а) и группы n параллельно установленных аппаратов (б)

Как и в предыдущих работах авторов [10, 11], в основу вывода математического выражения принципа сопоставления каскада и группы параллельно установленных аппаратов (рис. 1) положим равенство их полных эффективностей улавливания пыли с одинаковым распределением частиц по размерам δ , определяющимся нормированной дифференциальной весовой функцией $g(\delta)$, а также с одинаковыми их плотностью ρ_c и параметрами газа: плотностью ρ и динамической вязкостью μ . Кроме того, примем как экспериментально установленный и теоретически подтвержденный факт о правомерности представления фракционной эффективности инерционного улавливания пыли отдельным аппаратом в виде [5, 7, 9, 10, 14]

$$\eta_\delta = 1 - K_\delta = 1 - e^{-aStk^n}, \quad (1)$$

где η_δ и K_δ - фракционные эффективность улавливания и проскок пыли в аппарате; a - постоянная, характеризующая пылеулавливающие качества определенного типа аппарата, n - показатель числа Стокса $Stk = \tau V/d$, отражающий в среднем режим движения пыли в аппарате; $\tau = \rho_c \delta^2 / 18\mu$ - время динамической релаксации частиц; V и d - скорость и характерный линейный размер инерционного улавливания частиц пыли в аппарате.

Равенство полных эффективностей в сравниваемых системах требует также выполнения равенства и полных проскоков:

$$K_{\Sigma_{m,1}} = K_0 = K_{\Sigma}, \quad (2)$$

где

$$K_{\Sigma_{m,1}} = \int_0^{\infty} K_{\delta_1}^m g(\delta) d\delta = \int_0^{\infty} e^{-mA_1 \delta^{2n_1}} g(\delta) d\delta, \quad (3)$$

$$K_0 = \int_0^{\infty} K_{\delta_0} g(\delta) d\delta = \int_0^{\infty} e^{-A_0 \delta^{2n_0}} g(\delta) d\delta. \quad (4)$$

Из соотношений (2) – (4) с учетом того, что экспонента является незнакопеременной функцией, а $g(\delta)$ – осредняющей $\left(\int_0^{\infty} g(\delta) d\delta = 1 \right)$, в соответствии с теоремой о среднем следует

$$K_{\Sigma_{m,1}} = e^{-mA_1 \delta_{cp,m,1}^{2n_1}}; \quad K_0 = e^{-A_0 \delta_{cp,0}^{2n_0}}, \quad (5)$$

откуда

$$mA_1 \delta_{cp,m,1}^{2n_1} = A_0 \delta_{cp,0}^{2n_0}, \quad (6)$$

где $\delta_{cp,m,1}$ и $\delta_{cp,0}$ – некоторые средние размеры частиц, отвечающие равенствам (5),

$$A_1 = a_1 \left(\frac{\rho_{г} V_1}{18\mu d_1} \right)^{n_1}; \quad A_0 = a_0 \left(\frac{\rho_{г} V_0}{18\mu d_0} \right)^{n_0}. \quad (7)$$

Гидравлические сопротивления систем определяются выражениями

$$\Delta p_{\Sigma_{m,1}} = m \xi_1 \rho \frac{V_1^2}{2}; \quad \Delta p_{\Sigma_0} = \Delta p_0 = \xi_0 \rho \frac{V_0^2}{2}, \quad (8)$$

где ξ_1 и V_1 , ξ_0 и V_0 – коэффициенты сопротивлений и скорости очищаемого газа в рабочих сечениях аппаратов. В данном случае предполагается, что сопротивления подводящих коммуникаций к аппаратам незначительны в сравнении с общим сопротивлением систем. Более того, они ещё в какой-то мере уравниваются при сопоставлении.

Выразим скорости V_0 и V_1 из соотношений (8) через потери давления и подставим их в (7), и далее полученные соотношения для A_0 и A_1 – в (6). После несложных преобразований получим зависимость между потерями давления на каскаде $\Delta p_{\Sigma_{m,1}}$ и в системе, состоящей из группы установленных параллельно аппаратов, Δp_0 , для которой предполагается, что сопротивление и эффективность системы равны сопротивлению и эффективности одного аппарата, в виде

$$\frac{\Delta p_{\Sigma_{m,1}}^{n_1}}{\Delta p_0^{n_0}} = A^2 \left(\frac{a_0}{ma_1} \right)^2 \left(\tau_{50}^2 \frac{2}{\rho} \right)^{(n_0 - n_1)} \frac{(m \xi_1 d_1^2)^{n_1}}{(\xi_0 d_0^2)^{n_0}}, \quad (9)$$

где

$$A = \left[\frac{\left(\frac{\delta_{cp,0}}{\delta_{50}} \right)^{n_0}}{\left(\frac{\delta_{cp,m,1}}{\delta_{50}} \right)^{n_1}} \right]^2, \quad (10)$$

δ_{50} – медиана распределения частиц, $\tau_{50} = \frac{\rho_{\text{ч}} \delta_{50}^2}{18\mu}$.

Зависимость (9) представляет собой математическое выражение энергетического принципа сравнения двух систем с последовательной и параллельной установкой аппаратов при произвольном законе распределения частиц по размерам $g(\delta)$, с которым связаны средние размеры частиц $\delta_{\text{ср.м.1}}$, $\delta_{\text{ср.0}}$ и δ_{50} :

$$\delta_{\text{ср.м.1}} = \left(\frac{-\ln K_{\Sigma}}{mA_1} \right)^{1/2n_1}, \quad \delta_{\text{ср.0}} = \left(\frac{-\ln K_{\Sigma}}{A_0} \right)^{1/2n_0}, \quad \int_0^{\delta_{50}} g(\delta) d\delta = 0,5, \quad (11)$$

где A_0 и A_1 определяются численно из интегралов (3) и (4) при заданных значениях величин m , n_1 , n_0 , K_{Σ} и функции $g(\delta)$.

Зависимость (9) должна быть дополнена равенством расходов очищаемого газа в сравниваемых системах. Характерные линейные размеры и скорости инерционного улавливания частиц d_i и V_i не всегда совпадают с диаметрами аппаратов и скоростями газов в них. Так, например, для скруббера Вентури $d_i = d_K$, где d_K – размер капли диспергируемой жидкости в горловине трубы Вентури, $V_i = V_{\text{ч}} - V_K$ – скорость частиц пыли относительно капель жидкости, близкая к скорости газа в горловине трубы ($V_{\text{ч}}$ – скорость частиц пыли, V_K – скорость капель). Но для циклонов размер d_i соответствует диаметру циклона, а скорость V_i – расходной скорости газа, отнесенной к его поперечному сечению. Для пенного аппарата d_i есть диаметр отверстий газораспределительной решетки, а V_i – скорость в этом отверстии. Поэтому в каждом конкретном случае равенство расходов очищаемого газа должно быть увязано со скоростями V_i .

Если линейные размеры d_i являются диаметрами расходных сечений аппаратов, то условие равенства расходов газа в системах эквивалентно соотношению

$$\left(\frac{d_1}{d_0} \right)^2 = n \left(\frac{V_0}{V_1} \right). \quad (12)$$

Выражая диаметр d_0 через d_1 из (12) и подставляя его в (9), получим

$$\frac{\Delta p_{\Sigma_{m,1}}^{n_1 + \frac{n_0}{2}}}{\Delta p_0^{n_0 + \frac{n_0}{2}}} = An^{n_0} \left(\frac{a_0}{a_{m,1}} \right)^2 \frac{\xi_{m,1}^{n_1 + \frac{n_0}{2}}}{\xi_0^{n_0 + \frac{n_0}{2}}} \left[\left(\frac{\tau_{50}^2}{d_1} \right)^2 \frac{2}{\rho} \right]^{(n_0 - n_1)}, \quad (13)$$

где

$$a_{m,1} = ma_1, \quad \xi_{m,1} = m\xi_1. \quad (14)$$

Учитывая (14), соотношение (13) можно переписать в виде

$$\frac{\Delta p_{\Sigma_{m,1}}^{n_1 + \frac{n_0}{2}}}{\Delta p_0^{n_0 + \frac{n_0}{2}}} = A \frac{n^{n_0}}{m^{2 - \frac{n_1}{2} - n_0}} \left(\frac{a_0}{a_1} \right)^2 \frac{\xi_1^{n_1 + \frac{n_0}{2}}}{\xi_0^{n_0 + \frac{n_0}{2}}} \left[\left(\frac{\tau_{50}^2}{d_1} \right)^2 \frac{2}{\rho} \right]^{(n_0 - n_1)}. \quad (15)$$

Как видно из (15), поскольку $n_0 \leq 1$, $n_1 \leq 1$, $2 - \frac{n_1}{2} - n_0 > 1$, с ростом m удельные энергозатраты каскада в сравнении с удельными энергозатратами одиночных аппаратов уменьшаются. В то же время с ростом n преимущества по удельным энергозатратам

каскадов по сравнению с параллельной установкой аппаратов снижаются. Однако надо иметь в виду, что диаметры d_1 и d_0 , скорости V_1 и V_0 , а также количества аппаратов n и m взаимно связаны условиями равенства эффективностей систем и расходов очищаемого газа.

С целью более ясного понимания такой взаимосвязи рассмотрим в качестве примера каскад последовательно и группу параллельно установленных аппаратов, для которых $n_0=n_1=q$, тогда в соответствии с (13) и (14) будем иметь $A=1$, поскольку из (3) и (4) следует $mA_1=A_0$, и соотношение (15) приводится к виду

$$\frac{\Delta p_{\Sigma_{m,1}}}{\Delta p_0} = n^{\frac{2}{3}} m^{1-\frac{4}{3q}} \left(\frac{a_0}{a_1} \right)^{-\frac{4}{3q}} \frac{\xi_1}{\xi_0}. \tag{16}$$

Зависимость (16) уже была получена в [10] при $n=1$.

Для аппаратов одного типа в сравниваемых системах $a_0 = a_1$, $\xi_0 = \xi_1$ зависимость (16) ещё более упрощается:

$$\frac{\Delta p_{\Sigma_{m,1}}}{\Delta p_0} = n^{\frac{2}{3}} m^{1-\frac{4}{3q}}. \tag{17}$$

Если принять удельные энергозатраты $\Delta p_{\Sigma_{m,1}}$ и Δp_0 равными, то из (17) следует связь между количеством аппаратов в сравниваемых системах

$$n = m^{\frac{2}{q} \frac{3}{2}}. \tag{18}$$

Кроме того, в этом случае из равенства сопротивлений систем и расходов будем иметь соотношения между диаметрами аппаратов и скоростями:

$$\frac{d_0}{d_1} = \frac{1}{m^{\frac{1}{q} \frac{1}{2}}}, \tag{19}$$

$$\frac{V_0}{V_1} = \sqrt{m}. \tag{20}$$

В общем виде для соотношения (16)

$$\frac{d_0}{d_1} = \sqrt[3]{n \left(\frac{ma_1}{a_0} \right)^{\frac{1}{q}}}, \frac{V_0}{V_1} = \sqrt[3]{n \left(\frac{ma_1}{a_0} \right)^{\frac{2}{q}}}. \tag{21}$$

Проведем некоторые оценки, пользуясь соотношениями (18) – (20), например, для циклонов СДК-ЦН-33, для которых $q=0,37$ [10]. Пусть каскад представляют $m=2$ таких циклона диаметром $d_1=300$ мм. Скорость очищаемого газа в них примем равной ее рекомендуемой величине $V_1=2,5$ м/с [8]. Тогда из (18) будем иметь $n=15$ таких же циклонов, установленных параллельно с диаметрами $d_0=65$ мм и скоростью газа в них $V_0=3,53$ м/с. Эффективность пылеулавливания этой системы и ее гидравлическое сопротивление будут точно такими же как и у каскада.

Можно ориентировочно оценить и относительную величину металлоемкости группы параллельных циклонов в сравнении с металлоемкостью каскада, полагая толщину стального листа h , из которого они изготавливаются, одинаковой:

$$\frac{M_0}{M_1} \sim \frac{n \pi d_0 h H_0}{m \pi d_1 h H_1} = \frac{n \pi d_0 h k d_0}{m \pi d_1 h k d_1} = \frac{n}{m} \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 = \frac{1}{m^{3/2}}, \quad (22)$$

где H_1 и H_0 - высоты аппаратов, k - коэффициент пропорциональности, связанный с типоразмерами, приводимыми, как правило, к диаметру аппарата.

Для рассматриваемого случая $M_0/M_1 \sim 0,354$. Это означает, что металлоемкость группы параллельных циклонов почти в 3 раза меньше металлоемкости эквивалентного каскада. С учетом уменьшения толщины стенки циклонов меньших диаметров [8], а также возможности установки одного пылесборного бункера в группе параллельных аппаратов и невозможности это сделать для каскада величина M_0/M_1 будет ещё меньше.

Эффективность улавливания пыли с параметрами $\rho_p=2650 \text{ кг/м}^3$, $\sigma=4$, $\delta_{50}=6 \text{ мкм}$ для сопоставленных систем будет равна $\eta=91\%$, а сопротивление $\Delta P=3900 \text{ Па}$. Для обеспечения улавливания той же пыли с эффективностью $\eta=95\%$ циклонами СДК-ЦН-33 с диаметрами $d_j=300 \text{ мм}$ и скоростью в них $V_j=2,5 \text{ м/с}$ уже потребуется $m=3$ аппарата в каскаде, а в группе - $n=74$ аппарата с диаметрами $d_0=27 \text{ мм}$ и скоростью в них $V_0=4,33 \text{ м/с}$. При этом $M_0/M_1 \sim 0,192$, а $\Delta P=5850 \text{ Па}$. Однако надежность работы такой группы мультициклонов будет невысокой в связи с возможностью их забивания пылью и сложностью обеспечения равномерности распределения газа между ними в системе, отчего существенно, как известно, зависит эффективность пылеулавливания.

Значение эффективности $\eta=95\%$ для заданной пыли, по-видимому, является предельной величиной для одиночных циклонов СДК-ЦН-33, да и в целом для циклонов НИИОГАЗ. Эта задача может быть успешно решена аппаратами других типов, например, пенными (ПА) [10]. Расчеты показывают, что для принятых условий установка одного ПА диаметром $d_{ПА}=387 \text{ мм}$ с диаметром отверстий $d_0=2 \text{ мм}$ в газораспределительной решетке, коэффициентом её живого сечения $s=0,025$, скоростью газа в отверстиях $V_0=60 \text{ м/с}$, толщиной «светлого» слоя воды над решеткой $h_0=2 \text{ см}$ дает ту же эффективность $\eta=95\%$, но при $\Delta P=3333 \text{ Па}$. Перепад давления может быть существенно снижен, если использовать многополочный ПА. Так, для ПА с двумя полками $d_0=3,2 \text{ мм}$, $V_0=23,8 \text{ м/с}$ и теми же остальными параметрами и эффективностью пылеулавливания в соответствии с формулой (16) сопротивление уменьшается более чем вдвое ($\Delta P=1474 \text{ Па}$) по сравнению с однополочным ПА.

Частичный анализ соотношения (9) для ряда пылеуловителей проведен в работах авторов [10-12, 15] при логарифмически нормальном законе распределения частиц по размерам, при котором после замены δ на переменную $t = \lg(\delta/\delta_{50})/\lg \sigma$

$$A = \sigma^{2(n_0 t_{cp,0} - n_1 t_{cp,m,1})}, \quad (23)$$

где

$$t_{cp,0;m,1} = \frac{1}{2n_i} \frac{\ln\left(\frac{-\ln K_\Sigma}{\alpha_i}\right)}{\ln \sigma}, \quad i = 0; m, 1, \quad (24)$$

$$\alpha_i = \beta_i Stk_{i,50}^n, \quad \beta_0 = a_0, \quad \beta_{m,1} = m a_1, \quad Stk_{i,50} = \frac{\tau_{50} V_i}{d_i}, \quad n_{m,1} = n_1, \quad V_{m,1} = V_1, \quad d_{m,1} = d_1.$$

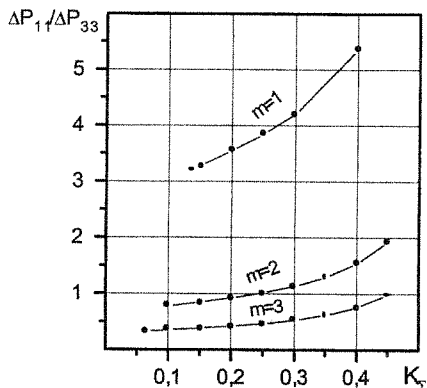


Рис. 2. Сравнение перепадов давления в каскаде циклонов ЦН-11 ΔP_{11} и в одиночном циклоне СДК-ЦН-33 ΔP_{33} при параметрах пыли $\sigma=4$, $\delta_{50}=5$ мкм, $\rho_{\text{п}}=2650$ кг/м³

- из конических циклонов СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34 наименьшие удельные энергозатраты обеспечиваются циклоном СДК-ЦН-33; эффективность улавливания тонкодисперсной пыли в каскадах этих аппаратов может быть достигнута достаточно высокой.

На рис. 2 приведены результаты расчета по формуле (15) с коэффициентом A , выражающимся зависимостью (23), отношения перепадов давления в каскаде m циклонов ЦН-11 к перепадам давления в одиночном циклоне СДК-ЦН-33 при параметрах логарифмически нормального закона распределения частиц пыли $\sigma=4$, $\delta_{50}=5$ мкм, плотности $\rho_{\text{п}}=2650$ кг/м³ и скорости газа в циклоне СДК-ЦН-33 $V_0=1,6$ м/с. Из рисунка следует, что одиночный циклон ЦН-11 по удельным энергозатратам превосходит циклон СДК-ЦН-33 в 3 и более раз, в то время как при $m=2$ удельные энергозатраты становятся сопоставимыми, а в каскаде 3-х циклонов ЦН-11 затрачивается энергии вдвое меньше, чем в эквивалентном циклоне СДК-ЦН-33. Однако при невысоких значениях суммарной эффективности пылеулавливания применение каскадных систем становится нецелесообразным.

Из приведенных примеров видно, что математическое выражение принципа, полученное в данной работе, представляет собой эффективный инструмент, обладающий большими возможностями производить выбор оптимального с экономической точки зрения пылеулавливающего оборудования с приемлемыми характеристиками, отдавая предпочтение одним схемам установки аппаратов в сравнении с другими.

Литература:

1. Русанов А.А., Урбах И.И., Анастасиади А.П. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике. – М.: Энергия, 1969.
2. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981.
3. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве. – М.: Металлургия, 1990.
4. Банит М.И., Мальгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1979.

На основе соотношения (16) проведен анализ энергоемкости циклонов НИИОГАЗ по группам, для которых показатели при числах Stk близки друг к другу. В результате установлено:

- наиболее эффективным и менее энергоемким из цилиндрических циклонов является ЦН-11;
- самым энергоемким является циклон ЦН-24; удельные энергозатраты в нем почти в 2 раза выше, чем в циклоне ЦН-11;

5. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975.
6. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981.
7. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд.: В 2-х ч., Ч.1: Пер. с англ./ Под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. – М.: Металлургия, 1988.
8. Циклоны НИИОГАЗ/ Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. – Ярославль, 1970.
9. Шияев М.И. Проблемы экономики очистки газов на предприятиях по производству строительных материалов// Нетрадиционные технологии в строительстве: Материалы международного научно-технического семинара. Ч.1. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999.
10. Шияев М.И., Дорохов А.Р. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999.
11. Энергетический принцип сопоставления и компоновки пылеулавливающего оборудования/ М.И. Шияев, А.М. Шияев, П.В. Афонин, Ю.Н. Кобякова // Очистка и обезвреживание дымовых газов из установок, сжигающих бытовые отходы и мусор. Под ред. д.ф.-м.н. С.В. Алексеенко и д.т.н. А.С. Басина. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1999.
12. Шияев М.И., Дорохов А.Р. Критерии выбора и сравнения аппаратов газоочистки// Изв. вузов. Строительство, 1998, №6.
13. Шияев А.М. и др. Экспериментальная проверка энергетического принципа сравнения и компоновки пылеулавливающего оборудования на каскаде циклонов НИИОГАЗ// Нетрадиционные технологии в строительстве: Материалы международного научно-технического семинара. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2001.
14. Аппроксимация данных и номограмма для расчета эффективности пылеулавливания в пенном аппарате/ М.И. Шияев, Д.М. Шашко, Д.Г. Серебряков, А.И. Поливанов // Труды НГАСУ. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2000, Т.3, №2(9).
15. Шияев М.И., Кобякова Ю.Н. Сравнение удельных энергозатрат на очистку газа от пыли в многополочном пенном аппарате и скруббере Вентури// Изв. вузов. Строительство, 2000, №4.