

УДК 621.928.93

## ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВЗВЕСИ В РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ ПРЯМОТОЧНОГО ЦИКЛОНА

© 2022 г. Н. А. Марцулевич<sup>а, \*</sup>, О. М. Флисюк<sup>а</sup>, И. Г. Лихачев<sup>а</sup>, В. П. Мешалкин<sup>а</sup>,  
А. В. Гарабаджиу<sup>а</sup>, Н. Н. Кулов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup>Институт общей и неорганической химии (ИОНХ) им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: tohm1950@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 03.07.2022 г.

С помощью пакета программ *FlowVision* получены численные решения уравнений движения газозвеси в разделительной камере прямоточного циклона. Решения позволяют проследить зависимость основных гидродинамических характеристик и профиля концентрации частиц твердой фазы от геометрических параметров разделительной камеры. Показано, что основными факторами, оказывающими негативное влияние на эффективность работы циклона, являются циркуляционные течения газа и турбулентный “след” после завихрителя. Проведенный анализ позволил выработать рекомендации по выбору геометрических параметров камеры, сводящих к минимуму влияние указанных факторов.

**Ключевые слова:** прямоточный циклон, эффективность очистки, гидродинамика газозвеси, разделительная камера циклона, циркуляционные течения, турбулентное перемешивание

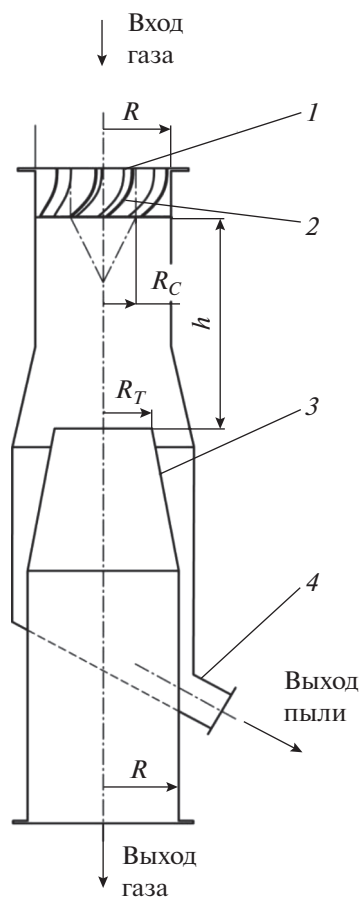
DOI: 10.31857/S0040357122060100

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема очистки крупномасштабных газовых выбросов предприятий химической, нефтехимической и смежных отраслей промышленности, а также теплоэнергетических установок, работающих на угле и мазуте, не теряет своей актуальности. Более того, с каждым годом она становится все острее. В последние годы появились технологии утилизации твердой фазы, которые позволяют из выбрасываемых в атмосферу отходов получать полезные продукты. В силу этих причин число публикаций, посвященных исследованию процесса разделения газозвесей и разработке эффективных конструкций пылеуловителей, не уменьшается. Немалая доля таких публикаций относится к изучению работы циклонов, обладающих рядом преимуществ по сравнению с другим очистным оборудованием [1–11]. В обзорной работе [5] приводится более трех десятков типовых конструкций циклонов и сепараторов с указанием их достоинств, недостатков и областей их предпочтительного применения. В частности, авторы отмечают сравнительно невысокую эффективность прямоточных циклонов при очистке газов от мелких частиц. При этом делается оговорка о недостаточной изученности циклонов

данного типа. С последним утверждением нельзя не согласиться. Действительно, до сих пор не существует надежных методов расчета прямоточных циклонов, позволяющих предсказать степень очистки газа при заданном его расходе и характеристиках дисперсности частиц пыли. Отсутствуют также методы проектирования таких циклонов, включая определение оптимальной геометрии разделительной камеры и лопастей завихрителя. Для создания указанных методов требуется, очевидно, детальное изучение характера движения частиц и газа в циклоне, поскольку именно гидродинамика газозвеси целиком определяет эффективность его работы. Ранее [12–15] авторами получены аналитические решения уравнений закрученного потока газозвеси в прямоточном циклоне. При этом использовались достаточно сильные допущения, касающиеся характера движения газа и частиц, что позволяло расценивать указанные решения как качественные.

Цель настоящей статьи состоит в анализе картины турбулентного течения запыленного газа в разделительной камере прямоточного циклона на основе результатов численного решения уравнений гидродинамики без использования упрощающих допущений. Анализ проведен на примере



**Рис. 1.** Схема прямооточного циклона. 1 – завихритель; 2 – лопасти завихрителя; 3 – патрубок для выхода очищенного газа; 4 – патрубок для выхода пыли ( $R = 75$  мм,  $R_C = 50$  мм,  $R_T = 70$  мм,  $h = 800$  мм).

прямоточного циклона с конкретной геометрией разделительной камеры [16], представленной на рис. 1. Тем не менее, выводы имеют общий характер и непосредственный практический выход.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

**Движение газа.** Если массовая концентрация частиц в потоке невелика (как это обычно бывает при работе циклонов), то их присутствие слабо влияет на поле скорости газа. Поэтому задачу можно разделить: сначала определить поле скоростей газовой фазы, а затем – характер движения частиц. Введем систему декартовых координат  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), направив ось  $Ox_3$  вдоль оси циклона. Тогда согласно гипотезе Буссинеска, которая устанавливает линейную связь между тензором Рейнольдсовых напряжений и тензором скоростей деформаций, уравнения, описывающие установившееся движение газа с учетом допущения о его несжимаемости, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_1}{\partial x_1} + \frac{\partial w_2}{\partial x_2} + \frac{\partial w_3}{\partial x_3} &= 0, \\ \rho w_1 \frac{\partial w_i}{\partial x_1} + \rho w_2 \frac{\partial w_i}{\partial x_2} + \rho w_3 \frac{\partial w_i}{\partial x_3} &= \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial w_i}{\partial x_1} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial w_i}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial w_i}{\partial x_3} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3.$$

Здесь  $\mu$  и  $\mu_t$  – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости движущейся среды, Па·с.

Величина  $\bar{p} = p + \frac{2}{3}k$  учитывает вклад в энергию статического давления кинетической энергии

турбулентных пульсаций:  $k = \rho \sum_i \frac{(w_i')^2}{2}$ .

Решение системы уравнений (1) проводилось с помощью пакета программ *FlowVision*. При этом использовалась стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, в которой коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_t$  определяется скоростью диссипации энергии турбулентности  $\epsilon$  и ее интенсивностью посредством соотношения:  $\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon}$ .

Указанная модель включает уравнения для величин  $k$  и  $\epsilon$ , которые замыкают систему уравнений (1). Таким образом, в результате решения системы уравнений можно получить не только профили давления и проекций скорости газа во всей области течения, но и распределение энергии турбулентности, скорости ее диссипации и характер затухания на твердых поверхностях. Большие возможности пакета *FlowVision* обусловили его широкое использование в последнее время для решения разнообразных задач гидродинамики. В частности, в ряде работ с помощью этого инструмента проводилось численное интегрирование уравнений движения закрученного потока газа и содержащихся в нем частиц [17–21].

Выбор расчетной области для уравнений (1) определялся исходя из следующих соображений. Непосредственное измерение скорости газа, а также визуализация потока в прямооточном циклоне убеждают в том, что каждая лопасть завихрителя формирует течение близкое к струйному, так что газ сходится с периферийной части кромки лопасти в виде относительно узкого “жгута”. Этот факт подтверждается и результатами расчетов (рис. 2). Если ограничить расчетную область только разделительной камерой циклона, как это сделано, например, в [22], то задание адекватных граничных условий на входе в нее будет невозможным. Поэтому в качестве одной из границ расчетной области в настоящей работе было взято

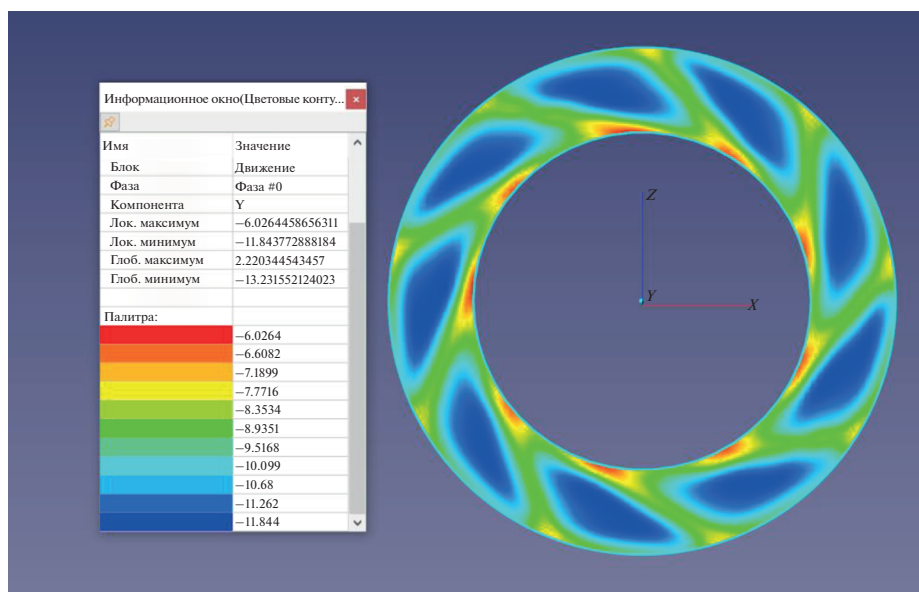


Рис. 2. Распределение продольной составляющей скорости газа на входе в разделительную камеру циклона.

поперечное сечение трубопровода, расположенное на расстоянии равном его диаметру от завихрителя вверх по потоку. Примерно на таком расстоянии поток “чувствует” предстоящее препятствие, и линии тока начинают искажаться [23]. Предполагалось, что в указанном сечении скорость газа распределена равномерно и направлена вдоль оси трубы. Другим граничным условием было равенство нулю скорости газа на всех твердых поверхностях, включая поверхности лопастей завихрителя (эффект прилипания).

На рис. 3 показаны полученные в результате решения уравнений (1) проекции линий тока на плоскость, проходящую через ось циклона. Число  $Re$ , рассчитанное по диаметру трубопровода, составляло значение 110000. Рисунок дает достаточно полное представление о характере движения газа в разделительной камере с данной геометрией. Область течения делится на две зоны, в которых гидродинамическая картина совершенно различна. В периферийной зоне закрученный поток газа движется строго вдоль стенки камеры с высокими скоростями. Центральную зону занимает турбулентный “след”, в котором генерируются обширные продольные циркуляции газа. Очевидно, что существование “следа” и циркуляционных течений являются факторами, существенно снижающими эффективность циклона. Другим таким фактором, препятствующим выводу частиц пыли из газового потока, служит их турбулентное перемешивание. Поэтому при анализе гидродинамики в разделительной камере представляет интерес профиль турбулентной энергии газа. Рис. 4 иллюстрирует зависимость энергии турбулентных пульсаций от расстояния до оси циклона. Из приведенной зависимости видно,

что наибольшая интенсивность турбулентности достигается именно в зоне циркуляционных течений. Следовательно, поток частиц пыли за счет турбулентного перемешивания в этой зоне в на-

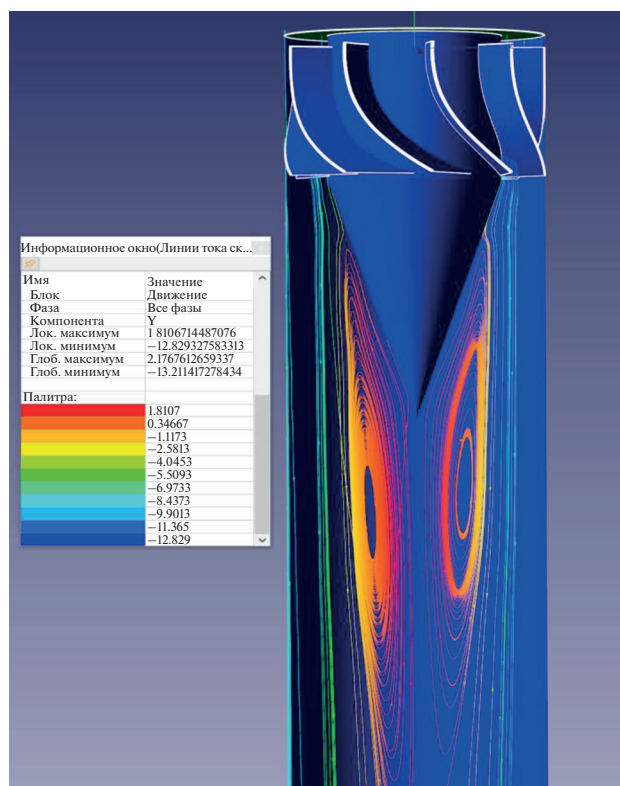


Рис. 3. Проекция линий тока газа на осевую плоскость циклона.

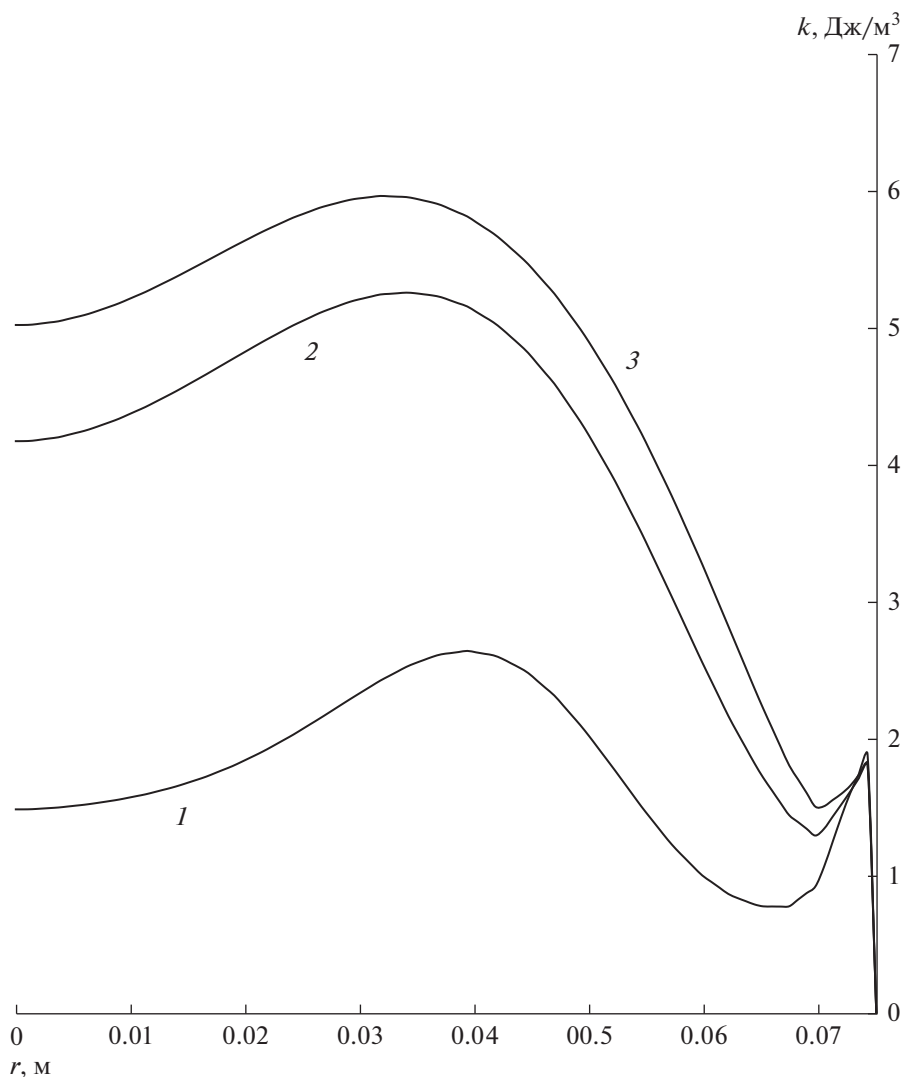
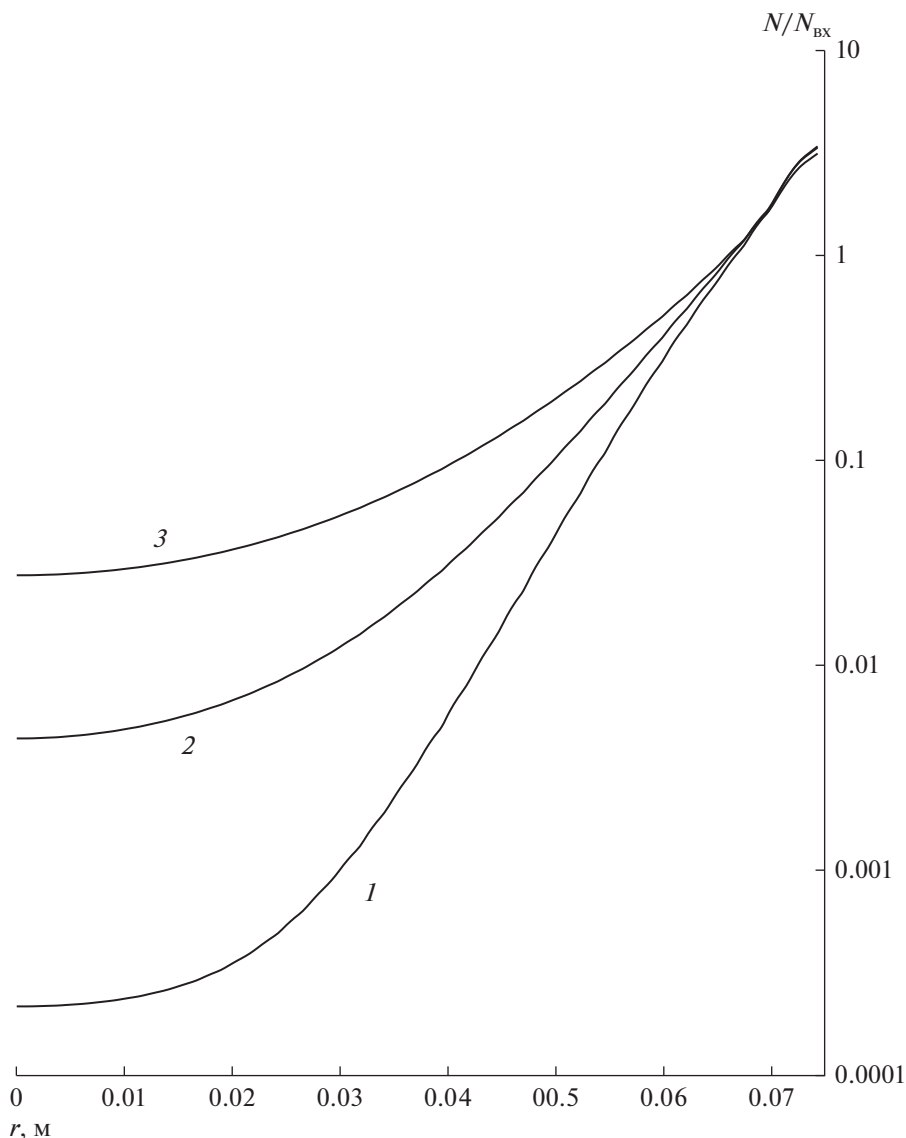


Рис. 4. Зависимость энергии турбулентных пульсаций от радиальной координаты на различном расстоянии от входа в камеру 1 – 0.3 м; 2 – 0.45 м; 3 – 0.6 м.

правлении к центру камеры (обратное перемешивание) также принимает максимальное значение. Еще одна область повышенной турбулентности расположена вблизи стенки. В этой области за счет больших градиентов средней скорости генерируется дополнительная турбулентность газа [24, 25], которая может быть причиной вторичного вовлечения в поток частиц пыли, уже заторможенных стенкой. Приведенные на рис. 4 зависимости позволяют сделать еще один важный вывод. С увеличением расстояния до входа в разделительную камеру интенсивность турбулентности заметно возрастает. Причиной этого, по-видимому, является резкая неоднородность профиля средней скорости в зоне циркуляций газа. Возникающая здесь турбулентность затем распространяется на остальной объем разделительной камеры.

**Совместное движение обеих фаз.** Для описания движения фазы частиц в пакете *FlowVision* используется подход взаимопроникающих континуумов [26], позволяющий сформулировать уравнения движения дисперсной фазы в форме аналогичной уравнениям (1). Отличие состоит в том, что движение газовой фазы обусловлено разностью давлений, а движение фазы частиц – силовым взаимодействием с газом:

$$\begin{aligned}
 & v_1 \frac{\partial m N v_i}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial m N v_i}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial m N v_i}{\partial x_3} = \\
 & = F_i + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ (\mu_i) \frac{\partial v_i}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ (\mu_i) \frac{\partial v_i}{\partial x_2} \right] + \\
 & + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[ (\mu_i) \frac{\partial v_i}{\partial x_3} \right], \quad i = 1, 2, 3.
 \end{aligned} \quad (2)$$



**Рис. 5.** Распределение относительной числовой концентрации частиц  $N/N_{BX}$  в зависимости от радиальной координаты на различном расстоянии от входа в камеру 1 – 0.3 м; 2 – 0.45 м; 3 – 0.6 м.

Равенство динамических коэффициентов турбулентной вязкости сплошной и дисперсной фаз обусловлено небольшим размером частиц пыли, когда они практически полностью увлекаются турбулентными образованиями газового потока [27, 28].

Некоторое отставание частиц от газа учитывается в выражении для силы межфазного взаимодействия, которое для режима стоксового обтекания имеет вид:

$$F = \rho N C_D \frac{\pi d^2}{8} |w - v|(w - v), \quad (3)$$

где коэффициент сопротивления движению частиц со стороны газа соответствует режиму стоксового обтекания:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} = \frac{24\mu}{\rho d |w - v|}. \quad (4)$$

Распределение числовой концентрации частиц пыли в разделительной камере циклона подчиняется уравнению конвективной диффузии:

$$\begin{aligned} v_1 \frac{\partial N}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial N}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial N}{\partial x_3} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_1} \left( D_t \frac{\partial N}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( D_t \frac{\partial N}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( D_t \frac{\partial N}{\partial x_3} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

В условиях, когда движение частиц определяется только взаимодействием с газом, коэффициент  $D_t$  практически совпадает с кинематическим коэффициентом турбулентной вязкости дисперсной

фазы  $v_t = \mu_t/\rho$ , поскольку механизм переноса импульса и массы один и тот же.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В пакете программ *FlowVision* уравнения (1)–(5) численно решаются совместно. Решения позволяют получить линии тока дисперсной фазы и распределение концентрации частиц пыли в разделительной камере. На рис. 5 приведены зависимости числовой концентрации частиц в логарифмических координатах от радиальной координаты для трех поперечных сечений, находящихся на различных расстояниях от входа в камеру. Из них видно, что сразу после завихрителя подавляющая доля частиц относится к стенке циклона. Однако затем за счет механизма турбулентного перемешивания начинается отток частиц из пристеночной области в ядро потока. Он достигает максимальных значений в области циркуляционных течений газа, где интенсивность турбулентности наибольшая. По этой причине прямоточный циклон с геометрией разделительной камерой, изображенной на рис. 1, в принципе не может обеспечить высокую степень разделения, особенно для мелких частиц порядка 10 мкм. Более крупные частицы в меньшей степени реагируют на турбулентность газа благодаря большей инерционности. Поэтому эффективность разделения для газозвесей с такими частицами может быть приемлемой.

Изложенные выше результаты анализа дают возможность сформулировать ряд практических выводов. Предполагаемая некоторыми исследователями невысокая эффективность прямоточных циклонов является мнимой. Она может быть связана только с неудачным проектированием разделительной камеры, включая геометрию завихрителя. Полученные в настоящей работе результаты убедительно показывают, что основными негативными факторами, снижающими эффективность разделения, являются циркуляционные течения и зоны повышенной турбулентности. Поэтому при проектировании прямоточных циклонов необходимо подбирать геометрические параметры камеры таким образом, чтобы гидродинамическая картина в них не содержала ни того, ни другого. Так, авторами [12] предложена конструкция разделительной камеры, устраняющая циркуляционные течения и турбулентный “след” после завихрителя. По-видимому, сокращение длины камеры также будет способствовать увеличению степени очистки газа, поскольку перенос частиц пыли от стенок камеры за счет механизма турбулентного перемешивания начинает существенно сказываться на расстояниях порядка 50–100 мм от входа. Разумеется, более точные рекомендации по выбору оптимальных значений геометрических параметров разделительной камеры прямоточных циклонов могут быть даны после

полного изучения их влияния на степень очистки газа от пыли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное решение уравнений гидродинамики для газозвесей позволило выявить те физические факторы, которые могут служить причинами снижения эффективности прямоточных циклонов. Указанные решения, кроме того, дают возможность на стадии проектирования провести целенаправленный выбор геометрических параметров разделительной камеры, которые устраняют или сводят к минимуму негативное влияние этих факторов, сохраняя при этом все достоинства прямоточных циклонов.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ (проект 21-79-30029).

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

$w_i$	проекция осредненной скорости газа на соответствующие оси координат, м/с
$w_i'$	компоненты пульсационной составляющей скорости газа, м/с
$v_i$	проекция осредненной скорости фазы частиц на соответствующие оси координат, м/с
$p$	статическое давление в газе, Па
$k$	кинетическая энергия турбулентных пульсаций в газе, отнесенная к единице объема, Дж/м <sup>3</sup>
$m$	масса частицы пыли, кг
$d$	эффективный диаметр частиц пыли, м
$N$	числовая концентрация частиц пыли, м <sup>-3</sup>
$F_i$	проекция силы межфазного взаимодействия на оси координат, отнесенные к единице объема, Н/м <sup>3</sup>
$D_t$	эффективный коэффициент перемешивания частиц, м <sup>2</sup> /с
$\rho$	плотность газа, кг/м <sup>3</sup>
$\mu$ и $\mu_t$	коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости движущейся среды, Па с
$\varepsilon$	скорость диссипации энергии турбулентности, Дж/м <sup>3</sup>
$\nu_t$	кинематический коэффициент турбулентной вязкости дисперсной фазы, м <sup>2</sup> /с
$Re$	число Рейнольдса

## ИНДЕКСЫ

$i$	номер компонента
$t$	величина, обусловленная турбулентностью

vx значение на входе в камеру  
 p параметр, рассчитанный по размеру частицы

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. М.: Химия, 1981. 392 с.
2. Cortes C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. Progress in energy and combustion science. 2007. V. 33. № 5. P. 409–452. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
3. Li Q., Xu W., Wang J., Jin Y. Performance evaluation of a new cyclone separator – Part I experimental results // Sep. Purif. Technol. 2015. V. 141. P. 53–58. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2014.10.030>
4. Xu W., Li Q., Wang J., Jin Y. Performance evaluation of a new cyclone separator – Part II simulation results // Sep. Purif. Technol. 2016. V. 160. P. 112–116. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2016.01.012>
5. Мисюля Д.И., Кузьмин В.В., Марков В.А. Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей. Труды БГТУ, Химия и технология неорганических веществ. 2012. № 3. С. 154–163.
6. Кутепов А.М. Разработка и использование высокоэффективных сепараторов для выделения пыли из газа / А.М. Кутепов, А.С. Жихарев // Химическая промышленность. 1998. № 8. С. 36–38.
7. Ehteram M.A., Tabrizi H.B., Mesbah M., Ahmadi G., Mirsalim M.A. Experimental study on the effect of connecting ducts on demisting cyclone efficiency / Exp. Therm. Fluid Sci. 2012. V. 39. P. 26–36. <https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2012.01.002>
8. Hreiz R., Gentric C., Midoux N., Lainé R., Fünfschilling D. Hydrodynamics and velocity measurements in gas–liquid swirling flows in cylindrical cyclones // Chem. Eng. Res. Des. 2014. V. 92. P. 2231–2246. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2014.02.029>
9. Elsayed K., Lacor C. The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance // Appl. Math. Model. 2011. V. 35. P. 1952–1968.
10. Cortes C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. Prog. Energy Combust // Sci. 2007. V. 33. P. 409–452. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2007.02.001>
11. Faulkner W., Shaw B. Efficiency and pressure drop of cyclones across a range of inlet velocities // Appl. Eng. Agric. 2006. V. 22. № 1. P. 155–161. <https://doi.org/10.13031/2013.20191>
12. Флисюк О.М., Марцулевич Н.А., Топталов В.С. Теоретическо-экспериментальный анализ зависимости эффективности прямооточного циклона от геометрии разделительной камеры // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 98–105. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216408.6419>
13. Топталов В.С., Марцулевич Н.А., Флисюк О.М. Очистка дымовых и технологических газов в прямооточных циклонах. Известия СПбГТИ(ТУ). 2021. № 56(82). С. 44–50. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2021-56-82-44-50>
14. Топталов В.С., Марцулевич Н.А. Движение запыленного газа в разделительной камере прямооточного циклона. Материалы XI научной конференции “Традиции и Инновации”. 1–3 декабря 2020 г. СПб: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2020. 272. С. 161.
15. Flisiyk O.M., Martculevich N.A., Toptalov V.S. Dusty gas movement in separating chamber of direct-flow cyclone. Vth international conference “Actual scientific & technical issues of chemical safety” ASTICS-2020. Kazan, Russia. P. 336–337.
16. Прямоточный циклон: пат. 195672, Рос. Федерация. № 2019136768; заявл. 15.11.2019; опубл. 03.02.2020; Бюл. № 4.
17. Hreiz R., Gentric C., Midoux N. Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones // Chem. Eng. Res. Des. 89(2011). 2521–2539. <https://doi.org/10.1016/J.CHARD.2011.05.001>
18. Oh J., Choi S., Kim J. Numerical simulation of an internal flow field in a uniflow cyclone separator. Powder Technol. 2015. V. 274. P. 135–145. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.01.015>
19. Gao X., Chen J., Feng J., Peng X. Numerical investigation of the effects of the central channel on the flow field in an oil–gas cyclone separator. Comput. Fluids. 2014. V. 9. P. 45–55. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2013.06.004>
20. Кепа А. The efficiency improvement of a large-diameter cyclone – the CFD calculations // Sep. Purif. Technol. 2013. V. 118. P. 105–111. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2013.06.040>
21. Bernardo S., Mori M., Peres A.P., Dionísio R.P. 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles. Powder Technol. 162(2006). 190–200. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2005.11.007>
22. Long Huang, Songsheng Deng, Zhi Chen, Jinfa Guan, Ming Chen. Numerical analysis of a novel gas-liquid pre-separation cyclone / Separation and Purification Technology. 2018. V. 194. P. 470–479. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2017.11.066>
23. Альбом течений жидкости и газа: А56 Пер. с англ. / Сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986. 186 с.
24. Ротта И.К. Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1967. 232 с.
25. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
26. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 464 с.
27. Марцулевич Н.А. Хаотическое движение частиц в турбулентном потоке газа / Теор. основы хим. технологии. 1987. № 3. С. 362–367.
28. Марцулевич Н.А., Протодьяконов И.О. Хаотическое движение фаз в потоках газовзвесей / Журн. прикл. химии. 1984. Т. 57. № 4. С. 947–950.