

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-2.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/07TVN217.pdf>

Статья опубликована 22.03.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Устинов Н.А., Вандышева А.А., Денисенко И.П., Губатенко М.С. Снижение аэродинамического сопротивления противоточных циклонов теплоэнергетических установок // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/07TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 621.928.9**

**Устинов Николай Андреевич**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия, Балаково<sup>1</sup>  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [nikandrust@gmail.com](mailto:nikandrust@gmail.com)

**Вандышева Анна Александровна**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия, Балаково  
Ассистент  
E-mail: [AAVandyшева@mephi.ru](mailto:AAVandyшева@mephi.ru)

**Денисенко Ирина Петровна**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия, Балаково  
Кандидат технических наук  
E-mail: [irishka.den@mail.ru](mailto:irishka.den@mail.ru)

**Губатенко Марк Сергеевич**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия, Балаково  
Кандидат технических наук  
E-mail: [msgubatenko@mephi.ru](mailto:msgubatenko@mephi.ru)

## **Снижение аэродинамического сопротивления противоточных циклонов теплоэнергетических установок**

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментального исследования снижения аэродинамического сопротивления противоточного циклона типа ЦН-15. Снижение сопротивления достигнуто уменьшением турбулентности потока воздуха при переходе из кольцевой камеры очистки воздуха в выхлопную трубу, за счет плавного перехода через кромку трубы. Плавность перехода обеспечена установкой на кромку выхлопной трубы насадочного тела, составленного из полого конуса и, сопряженного с ним тора. Исследование выполнено на макете циклона с рядом насадок, отличающихся диаметром сечения тора и углом наклона образующей конуса. Изготовлен стенд для испытания макета циклона, включающий в состав собственно макет циклона, центробежный вентилятор, расходомер воздуха, дифференциальный водяной манометр и воздушный анемометр. Определена погрешность

---

<sup>1</sup> 413853, Саратовская область, г. Балаково ул. Чапаева, 140

измерения результатов исследования. Сравнение сопротивления циклона с различными исполнениями насадки, выполнены при одинаковом расходе воздуха из условия рекомендуемой скорости воздуха во впускном патрубке для циклонов данного типа. Установлено что увеличение диаметра сечения тора до некоторого значения приводит к снижению аэродинамического сопротивления циклона. Дальнейшее увеличение диаметра сечения тора приводит к возрастанию сопротивления циклона. Уменьшение наклона образующей конуса насадки, также первоначально снижает сопротивление циклона, а потом начинает его увеличивать. Результаты обработки полученных экспериментальных данных позволили дать рекомендации по определению диаметра сечения тора и угла наклона образующей конуса в зависимости от диаметра циклона.

**Ключевые слова:** противоточный циклон; аэродинамическое сопротивление; насадочное тело; диаметр сечения тора; угол наклона образующей конуса

В теплоэнергетике до 70% энергообеспечение осуществляется за счет газа. При этом в стране огромные залежи каменного угля, с которого и начиналась теплоэнергетика. Вместе с тем местная теплоэнергетика обеспечивалась менее качественным топливом: бурый уголь, горючие сланцы и торф.

В ближайших планах предлагается снизить долю газового топлива за счет увеличения использования каменного угля [1].

Освоение территорий в сторону расположенных природных ресурсов, размещение переработки на местах для получения конечного продукта, а не вывоза сырья вызовет строительство городов и соответственно источников энергоснабжения. При наличии в данном регионе каменного угля, строящиеся теплоэлектроцентрали будут работать именно на нем.

Наиболее перспективными устройствами сжигания топлива являются циклонные котлы, в которых осуществляется сгорание пылевидного топлива. Но и это не обеспечивает полноты его сгорания. Для защиты окружающей среды от твердых выбросов применяются системы очистки газов на основе циклонных аппаратов и электрофильтры.

Аппараты центробежной очистки применяются для отделения твердых частиц. Как при очистке воздуха перед сжиганием, так и для очистки продуктов сгорания.

Для этого применяются циклоны самых различных конструкций. Прямоточные циклоны применяются для предварительной очистки от крупных частиц, как обладающие наименьшим сопротивлением по газу. Противоточные циклоны в зависимости от производительности, запыленности и размеров фракции применяются как одиночные так групповые и батарейные.

Групповые обеспечивают наибольшую производительность по газу. В то время, как батарейные (или мультициклоны) обеспечивают наибольшую тонкость отсева.

Циклоны обеспечивают производительность по газу от 283 м<sup>3</sup>/час до 54860 м<sup>3</sup>/час. Степень улавливания циклонов колеблется от 30% до 95%. Минимальная тонкость отсева составляет 5 микрон. Гидравлическое сопротивление циклонов составляет от 1250 Па, до 1500 Па, при улавливании частиц размером менее 5микрон.

С одной стороны, это обеспечивает выбор циклона под конкретные технологические параметры процесса, с другой стороны, говорит о том, что не существует одного типа самого лучшего циклона, который при любой производительности обеспечивал бы отсеивание самых мелких частиц, с наибольшей степенью улавливания и минимальном сопротивлении, из приведенных выше характеристик.

Существует большое количество стандартизованных типов циклонов: ВТИ, НИИОГАЗ, ВЦНИИОТ, РИСИ, СИОТ, «Клайпеда» типа К, ВЗП. При этом наибольшая доля циклонов приходится на НИИОГАЗ: ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24 СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СКЦН-34М, СК-ЦН-40. В различных областях техники превалирует различные типы циклонов [2].

В теплоэнергетике чаще всего это циклоны ЦН-15 [3].

Циклон ЦН применяется:

- для сухой очистки от слабослипающейся и среднеслипающейся пыли (размером более 10 мкм), выделяющихся при процессах сушки, обжига, агломерации, сжигания топлива;
- очистки аспирационного воздуха в промышленности строительных материалов, химической промышленности, нефтяной и машиностроительной промышленности, энергетике;
- для улавливания пыли при размоле топлива парогенераторов, сжигающих твердое топливо в пылевидном состоянии;
- в производствах, где транспортируемым продуктом являются: высушенные опилки, высушенная солома, мелкие частицы гранул, пыль.

Циклоны обеспечивают очистку от частиц пыли диаметром 20 микрон - степень очистки составляет 99,5%, для частиц диаметром 10 микрон - 95,0%, для частиц с диаметром 5 микрон - 83,0%.

Типоразмер циклонов, типа ЦН-15, обеспечивает очистку газов с объемной производительностью от до 2,5 м<sup>3</sup>/час до 4 м<sup>3</sup>/час, со степенью очистки 99,5% и улавливанием фракций размером до 5 микрон. Гидравлическое сопротивление циклонов этого типа находится в диапазоне 1250-1500 Па.

Коэффициент сопротивления циклонов при этом, в среднем составляет 147.

Снижение затрат мощности на очистку газов осуществляют снижением гидравлического сопротивления. Этому вопросу посвящено много исследований, но ни одно не реализовано в циклонах этого типа.

Так, в работах инженера А.Дж. Тер Линдена и О. Шиле, достигнуто снижение сопротивления на 26% и 42% соответственно [4].

Суммарные затраты на перемещение газа через циклон складываются из затрат энергии на преодоление потерь во входном канале, потерь при прохождении через камеру очистки, на выходе из камеры очистки и при прохождении выхлопной трубы.

При прохождении камеры очистки энергия затрачивается на крутку запыленного газа и на его трение о стенки кольцевой камеры, состоящей из внутренней поверхности корпуса и наружной поверхности выхлопной трубы.

Аналогичные потери происходят и в выхлопной трубе, но трение осуществляется только о внутреннюю поверхность выхлопной трубы.

Основным методом снижения аэродинамического сопротивления является установка различного вида струевыпрямителей в выхлопной трубе. Эти устройства предназначены для преобразования вращательного движения газа в выхлопной струе, которое является, преимущественно, турбулентным в прямолинейное, ламинарное.

Так, например, Чалов В.А. предложил устанавливать направляющее устройство в выхлопном патрубке, состоящем из направляющих щитков и обтекателя, которые

устанавливаются в выхлопном патрубке циклона ЦН-15. Это снижает аэродинамическое сопротивление циклона на 10,3%. Что, в свою очередь, снижает затраты мощности на привод вентилятора на 6,2% [5].

Применение раскручивающих устройств в выхлопном патрубке не только снижает их аэродинамическое сопротивление, но и увеличивает степень очистки на 2-3% [6].

Однако есть утверждение, что установка в выхлопном патрубке раскручивателей потока позволяет снизить сопротивление циклонов типа ЦН-15 на 25-30%, при том, что эффективность циклона по очистке мелкодисперсной фракции останется неизменной. Дополнительное снижение сопротивления циклона позволяет добиться установка на выходе циклона типовая улитка с поворотом газа на 90° еще на 5-10% [7].

Большую подборку раскручивателей потока на входе в выхлопную трубу рассмотрели авторы статьи. [8]. Которые, в зависимости от сложности устройства обладают различной степенью снижения сопротивления

Из приведенного следует, что в основном направления исследований заключаются в разработке устройств по снижению сопротивления в выхлопном патрубке. Учитывая, что уже достигнуто снижение на 30%, дальнейшее снижение на каждые 1% будут представлять сложную задачу, поэтому авторы взялись за снижение сопротивления на участке перехода газа из камеры очистки в выхлопную трубу.

Основным препятствием внедрению является необходимость существенного изменения конструкции циклона с изменением его цены, не всегда окупаемой за срок его службы.

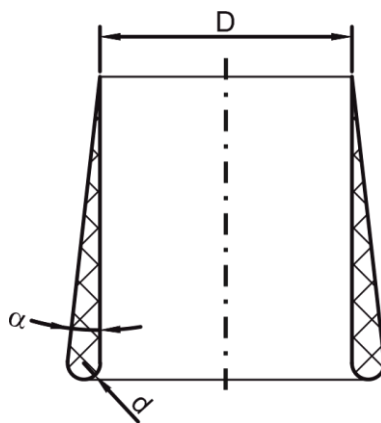
Авторами рассмотрена возможность внедрения мероприятий по снижению сопротивления не изменением конструкции, а использованием легко монтируемых добавочных элементов, которые можно заменять при их абразивном изнашивании.

Идея заключается в том, что снижается наибольшая составляющая гидравлического сопротивления - переход из кольцевой камеры очистки в выхлопную трубу. В основу положено предположение, если минимизировать турбулентность потока при преодолении данного местного сопротивления, то и общее гидравлическое сопротивление снизится.

Ответу на этот вопрос и направлена данная работа.

В качестве объекта исследования выбран макет циклона ЦН-15 с размерами: диаметр циклона 54 мм, высота цилиндрической части 86,4 мм, высота конической части 108мм, диаметр выходной трубы 31 мм. Для снижения сопротивления выбрано насадочное тело, устанавливаемое на выхлопную трубу, представляющее собой комбинацию тора, охватывающего срез выхлопной трубы и полого конуса, образующая которого, является касательной к окружности сечения тора и направлена под углом к цилиндрической поверхности выхлопной трубы [9].

На рис. 1 представлена конструкция этой насадки, устанавливаемая на выхлопную трубу, которая характеризуется наружным диаметром тора -  $D$ , диаметром сечения тора -  $d$ , и углом наклона образующей конуса к оси выхлопной трубы -  $\alpha$ .



**Рисунок 1.** Конструкция насадки (разработано авторами)

Насадка является сплошным телом, которое может быть установлено на выхлопную трубу пайкой, сваркой, посадкой с натягом, на резьбе или с помощью какого-либо фиксирующего элемента.

Было изготовлено 9 вариантов насадки, отличающихся  $d$  и  $\alpha$ . Размеры вариантов представлены в таблице 1 (составлено авторами).

**Таблица 1**

Вариант	0 (без насадки)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d$ , мм	-	3	3	3	4	4	4	5	5	5
$\alpha$ , град	-	5,5	6,5	7,5	5,5	6,5	7,5	5,5	6,5	7,5
$H$ , мм. вод. ст.	140	126	120	123	105	100	110	150	143	157

Измерение сопротивления циклона с различными вариантами насадки выполнялось на стенде, который кроме макета циклона содержит центробежный вентилятор типа СЕ 140S-125, расходомер воздуха - ротаметр РМ-6,3 ГУЗ, водяной дифференциальный манометр со шкалой 800 мм. Погрешность измерения расхода воздуха составила  $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$ , погрешность измерения гидравлического сопротивления  $\pm 1$  мм. вод. столба.

Скорость воздуха вычислялась по величине расхода и сечению канала в циклоне. На входе и выходе циклона дополнительно скорость измерялась анемометром модели AR816<sup>+</sup>. Расхождения значений скорости составило не более 4%.

Типовым режимом работы циклона является скорость газа во входной трубе циклона  $\omega_{\text{вх}}=10-20 \text{ м/с}$ , в выхлопной трубе циклона  $\omega_{\text{вых}}=5-10 \text{ м/с}$ , в самом циклоне  $\omega_{\text{ц}}=10-20 \text{ м/с}$ .

Во время испытаний устанавливалась скорость во входной трубе  $\omega_{\text{вх}}=5 \text{ м/с}$ . В выхлопной трубе при этом скорость составляла  $\omega_{\text{вых}}=1 \text{ м/с}$ .

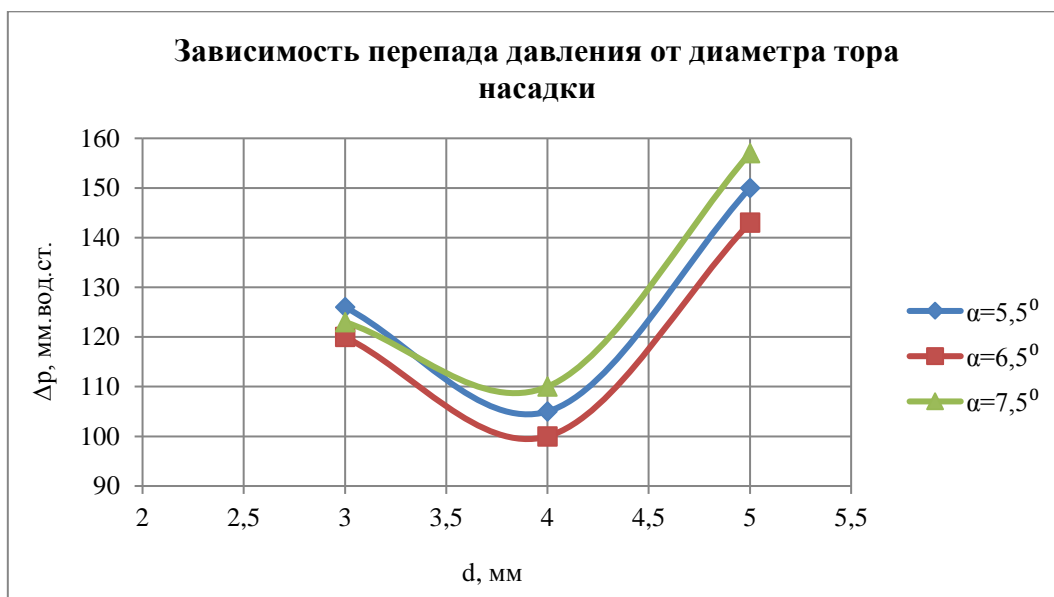
Из исследований других авторов следует, что число Рейнольдса не влияет на гидравлическое сопротивление циклона [10], по этой причине нет необходимости устанавливать подобие моделирования между геометрическим подобием, подобием скоростей и подобием физических свойств.

Результат измерения гидравлического сопротивления макета циклона без насадки и с различными вариантами насадки представлен в нижней строке таблицы 1.

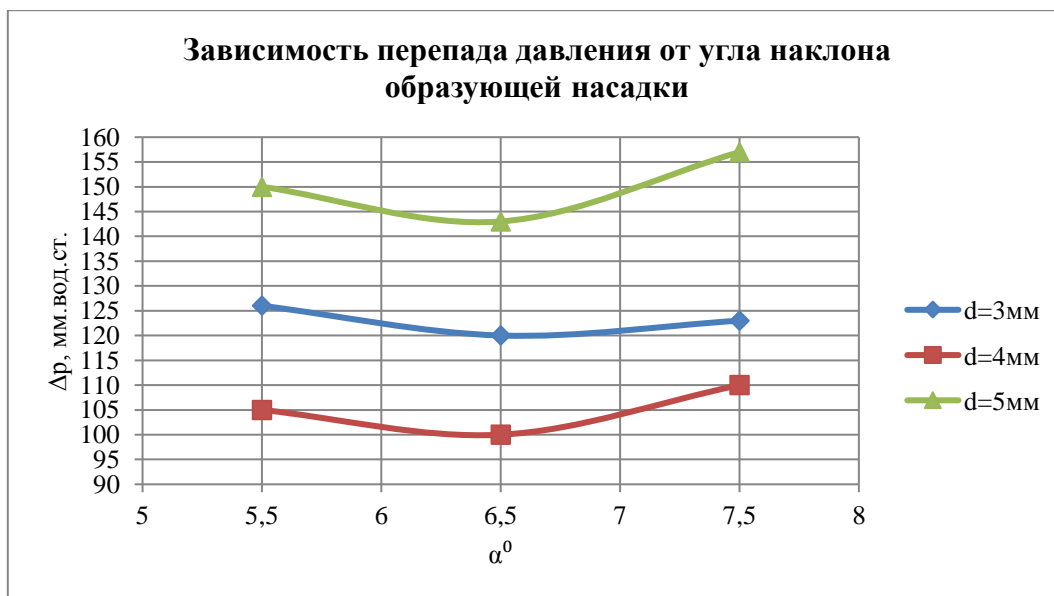
При исследованиях гидравлического сопротивления применялся чистый воздух. Это упрощает процедуру выбора конфигурации насадки, обеспечивающей минимальное

сопротивление. Далее, аналогичные измерения можно проводить с запыленным воздухом с различной концентрацией пыли и ее дисперсного состава.

Влияние на сопротивление циклона диаметра тора насадки  $d$  и угла наклона образующей  $\alpha$  представлено на рис. 2 и 3.



**Рисунок 2.** Влияние угла наклона образующей насадки на величину гидравлического сопротивления (составлено авторами)



**Рисунок 3.** Влияние диаметра тора насадки на величину гидравлического сопротивления (составлено авторами)

Авторы предполагали, что чем плавнее вход потока на кольцо тора, т.е. чем меньше угол наклона образующей конусной части насадки на кольцевую часть насадки, тем меньше гидравлическое сопротивление. Но при этом, уменьшение угла наклона приводит к увеличению высоты насадки (ее габаритов) и эксперименты с углом проводились для получения ответа, начиная с какого значения угла  $\alpha$  его влияние на величину сопротивления станет несущественным.

Однако эксперименты показали, что это не так, и есть угол, при котором сопротивление наименьшее, в нашем случае это  $6,5^0$ . Вероятно это связано с эффектом, огибания потоком газа цилиндрическую часть насадки, перед его поворотом в выхлопную трубу. Но для этого авторы планируют провести отдельные эксперименты на специально подготавливаемом стенде.

Влияние диаметра тора  $d$  на величину гидравлического сопротивления показало, что чем плавнее поворот потока в выхлопную трубу, тем меньше гидравлическое сопротивление циклона, но до тех пор, пока не начнет проявляться увеличение сопротивления из-за уменьшения проходного сечения кольцевой камеры циклона. Проведенные исследования позволили сделать следующий вывод для циклонов типа ЦН-15:

1. Введением дополнительно элемента в циклон можно уменьшить затраты энергии на перемещение газа через циклон.
2. Диаметр тора кольцевой части насадки должен быть  $d = 0,07 D_{\text{ц}}$  (7% от диаметра циклона).
3. Угол наклона образующей конической части насадки должен быть  $6,5^0$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Базеев Е.Т., Билека Б.Д. и другие Книга 3. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>.
2. Иванов В.С., Суслов Д.Ю. Тенденции развития обеспыливающих аппаратов циклонного типа. Современные наукоемкие технологии. - 2014. - № 7 (часть 2) - С. 68-70.
3. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г. Очистка газов: Справочное издание / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 640 с.
4. В. Страус Промышленная очистка газов: Пер. с англ. - М., Химия, 1981. 616 с., ил.
5. Чалов В.А. Противоточный циклон с направляющим устройством выхлопного патрубка / В.А. Чалов // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Перспективы развития строительного комплекса». Астрахань, 2012. - Т.1. - С. 66-68.
6. Агарков А.М. Направления совершенствования конструкций циклонных аппаратов. ЭПИ международный научно-практический журнал «Эпоха науки»: Научный журнал / Отв. составитель А.Н. Полубояринова. - Вып.4. - 2015. - 662 с. - С. 393-395.
7. Кузьмин В.В., Мисюля Д.И., Марков В.А. Резервы снижения энергозатрат в системах газоочистки и вентиляции. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011; (6):66-72.
8. Кузьмин В.В., Марков В.А., Мисюля Д.И. Конструктивные особенности раскручивающих устройств для циклонов, [Текст], БГТУ Минск: БГТУ, 2011. - ил., табл. Труды БГТУ. Сер. Химия и технология неорганических веществ, Минск: БГТУ, 2011, №3 (141). - С. 153-161.
9. Пат. 93037 Российская федерация. МПК В04С 7/00. Противоточный циклон с пониженным гидравлическим сопротивлением / Устинов Н.А., Грунин А.Н., Матказина А.А.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный технический университет. - №2008147595/22; заявл. 02.12.2008; опубл. 20.04.10, Бюл. №11.
10. Василевский М.В. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах: учеб. пособие / М.В. Василевский, Е.Г. Зыков. - Томск: Изд-во ТПУ, 2005. - 86 с.

**Ustinov Nikolai Andreevich**

National research nuclear university «MEPhI»  
Balakovo institute of engineering and technology (branch), Russia, Balakovo  
E-mail: [nikandrust@gmail.com](mailto:nikandrust@gmail.com)

**Vandysheva Anna Aleksandrovna**

National research nuclear university «MEPhI»  
Balakovo institute of engineering and technology (branch), Russia, Balakovo  
E-mail: [AAVandysheva@mephi.ru](mailto:AAVandysheva@mephi.ru)

**Denisenko Irina Petrovna**

National research nuclear university «MEPhI»  
Balakovo institute of engineering and technology (branch), Russia, Balakovo  
E-mail: [irishka.den@mail.ru](mailto:irishka.den@mail.ru)

**Gubatenko Mark Sergeevich**

National research nuclear university «MEPhI»  
Balakovo institute of engineering and technology (branch), Russia, Balakovo  
E-mail: [msgubatenko@mephi.ru](mailto:msgubatenko@mephi.ru)

## **Reduction of air-flow resistance of reverse-flow cyclones of heat-power equipment**

**Abstract.** The results of experimental research of reduction of air-flow resistance of reverse-flow cyclones type TSN15 are presented. Resistance reduction has been achieved by decreasing of air-flow turbulence in going from air cleaning ring chamber to exhaust pipe because of smooth transition through pipe border. Smooth transition has been provided by installation of heading body, compiled of cored cone and tore, coupled with cone, onto exhaust pipe border. The research has been executed in prototype of cyclone with range of conductors, which differ in size diameter and angle of drop of ruling of a cone. The bench for investigation of cyclone prototype, including the same cyclone prototype, centrifugal blower, air flow meter, differential water manometer and air wind meter, has been manufactured. Error of experimental results has been estimated. Matching of resistance of cyclone with different types of conductor is fulfilled upon condition of the same air consumption with recommended air velocity in intake manifold of cyclones of this type. It is found that increasing of diameter size of tore to some magnitude provides cyclone aerodynamic drag decreasing. The next increasing of diameter size of tore provides increasing of cyclone resistance. Decreasing of conductor ruling of cone drop primary decreases resistance of cyclone, and then begins to increase it. The results of manipulating of gained experimental data allowed to give references of determine of tore diameter size and ruling of cone drop angle according to cyclone diameter.

**Keywords:** reverse-flow cyclone; aerodynamical drag; heading body; diameter size of tore; angle of drop of ruling of a cone