

УДК 621.928.93

UDC 621.928.93

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ****COMPARATIVE AERODYNAMIC TESTS  
OF CENTRIFUGAL DUST COLLECTORS***Н. Н. Азимова, И. С. Купцова, Ю. И. Булыгин**N. N. Azimova, I. S. Kuptsova, Y. I. Bulygin.*

Донской государственной технической  
университет, г. Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[bulyur\\_rostov@mail.ru](mailto:bulyur_rostov@mail.ru)  
[arkomaazimov@mail.ru](mailto:arkomaazimov@mail.ru)  
[i-kyptsova@mail.ru](mailto:i-kyptsova@mail.ru)

[bulyur\\_rostov@mail.ru](mailto:bulyur_rostov@mail.ru)  
[arkomaazimov@mail.ru](mailto:arkomaazimov@mail.ru)  
[i-kyptsova@mail.ru](mailto:i-kyptsova@mail.ru)

Проведены параллельные сравнительные аэродинамические испытания цилиндрического циклона с улиткой ЦН-15у-300 и запатентованного циклона с обратным конусом (ЦОК) на полупромышленной экспериментальной установке «Циклон». Экспериментально получены полные статические и динамические данные давления, скорости движения воздушного потока в разных точках сечений на входе и выходе циклонных аппаратов при различной производительности вытяжного вентилятора. Выявлен характер изменения полных давлений и скорости движения воздуха в различных измерительных точках.

The paper provides parallel comparative aerodynamic tests of the cylindrical cyclone with a volute TsN-15u-300 and the patented cyclone with an inverse cone on a semi-industrial experimental installation "Cyclone". The total, static and dynamic pressures, the speed of airflow at different points of the cross-sections at the inlet and outlet of the cyclone units at various capacities of the exhaust fan have been experimentally obtained. The nature of change in the total pressures and the speed of air movement in various measuring points have been revealed.

**Ключевые слова:** аэродинамика, эффективность, циклон, экспериментальная установка, конструктивные параметры.

**Keywords:** aerodynamics, efficiency, cyclone, experimental installation, design parameters.

**Введение.** Повышение эффективности пылеулавливания отходящих газов технологических процессов промышленных производств за счёт создания усовершенствованных конструкций центробежных пылеуловителей является актуальной задачей инженерной экологии.

Как известно, первый патент на конструкцию пылеуловителя-циклона был выдан в 1880 г. В настоящее время существует и применяется на практике большое количество пылеуловителей различной конструкции, действие которых основано на использовании различных физических принципов.

Однако, к сожалению, до настоящего времени не существует единого критерия для выбора оптимальной формы центробежных циклонов, хотя в конструкциях наиболее современных циклонов все сильнее проявляется тенденция развития конусной части.

Основная проблема заключается в том, что между геометрической формой циклонов и их эффективностью существует целый ряд связей, которые проявляются через сложную аэродинамику течений, возникающих в этих аппаратах. Именно изучению аэродинамики

исследуемых аппаратов разной формы и посвящается настоящая работа.

В задачу исследования входит сравнительный анализ аэродинамических характеристик аппаратов в зависимости от их конструктивных особенностей на основе проведенных экспериментов.

На кафедре «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета в течение последних лет ведутся научно-исследовательские работы (НИР) по исследованию аэродинамических характеристик и эффективности пылеулавливания циклонных аппаратов различной формы [1–3].

**Целью работы** является экспериментальное получение основных аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей разной формы (на предварительном этапе без бункеров) при проведении параллельных сравнительных испытаний.

**Постановка задачи исследования и требования к аэродинамическому эксперименту.**

Для достижения целей и решения поставленных задач были сформулированы требования к эксперименту:

- испытания проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.018–79 «Система стандартов безопасности труда, системы вентиляционные, методы аэродинамических испытаний»;
- используются поверенные и аттестованные средства измерения для таких испытаний;
- получить экспериментально полные, статические и динамические давления; скорость движения воздушного потока в разных точках по сечениям циклонных аппаратов при различной задаваемой производительности вытяжного вентилятора.

Экспериментальная установка включает в себя два аппарата Циклон «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300». Циклоны установлены параллельно с соблюдением равных параметров воздухопроводов, так чтобы можно было обеспечить исследование циклонных аппаратов различной формы параллельно (рис.1) [4–5].



Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — аппарат «Циклон ЦН15у-300», 2 — аппарат «ЦОК-200-300», 3 — входной патрубок «Циклон ЦН-15у-300», 4 — входной патрубок «ЦОК», 5 — закрываемая перегородка, 6 — выходной патрубок, 7 — радиальный вентилятор, 8 — электронный блок управления вентилятором

С помощью поочередного перекрытия перегородок в области входного патрубка с воздухопроводом, подающим воздушный поток в циклонный аппарат, появляется возможность проводить испытания аппаратов с разными конструктивными особенностями, но с равными параметрами воздуховода без потери времени на смену аппаратов и без нарушения герметичности воздуховода. Измерения на аппаратах проводятся без бункеров, отверстия герметично закрыты [6].

**Аэродинамические испытания полупромышленной установки.** Для проведения измерения аэродинамических характеристик циклонных аппаратов была собрана схема, где использованы дифференциальные манометры Testo 521–1 с комплектом напорных трубок Пито (рис. 2).

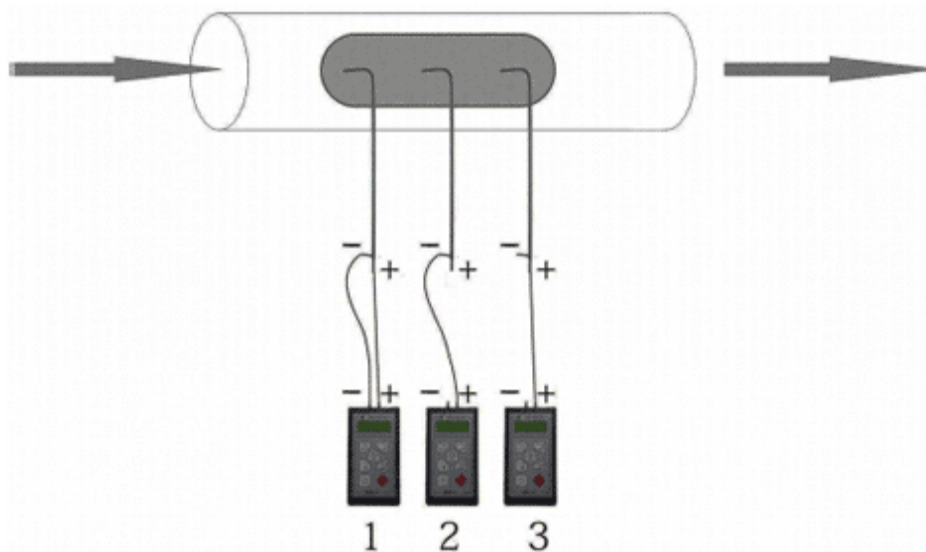


Рис. 2. Схема подключения трубки напорной модификации Пито, измерение:

- 1 — динамического давления и скорости потока,
- 2 — статического давления, 3 — полного давления

Трубка Пито представляет собой две Г-образные или цилиндрические трубки, при этом одна трубка находится внутри другой. Внутренние полости трубок изолированы друг от друга и не сообщаются между собой. Внутренняя трубка имеет торцевое отверстие, а наружная — отверстие на боковой поверхности. Вторые концы напорных трубок имеют штуцер и соединяются с дифференциальным манометром шлангами необходимой длины. В Г-образной трубке Пито торцевое отверстие служит для забора полного давления газа — статического и динамического. Отверстие на боковой поверхности служит для отбора только статического давления. В цилиндрических трубках боковое отверстие служит для забора полного давления, а торцевое — только для забора статического давления (рис. 2) [7].

Трубка Пито устанавливается в отверстие воздуховода на прямом участке соосно оси последнего так, чтобы отверстие, отвечающее за полный забор давления, было направлено в сторону потока. От правильной установки трубки зависит точность измерений.

Диапазон измерения скорости газового (воздушного) потока, составляет 4...21 м/с. При измерении скоростей от 1,5 до 4 м/с и от 21 до 40 м/с — погрешность не нормирована. Средний коэффициент преобразования динамического (скоростного) давления во всем диапазоне скоростей для напорной дифференциальной трубки Пито составляет 0,95...1,05. Предел допустимой относительной погрешности определения коэффициента преобразования напорной трубки для всего диапазона скоростей для напорной дифференциальной трубки Пито не более  $\pm 3\%$ .

**Дифференциальный манометр Testo 521–1.** Движение воздуха и изменение аэродинамических параметров внутри циклонного аппарата имеют более сложный характер, чем при входе и выходе из него. Поэтому для регистрации всех изменений необходимы более точные приборы, чем жидкостные манометры, класс точности которых составляет 2–4.

Дифференциальный манометр Testo 521–1 имеет внутренний сенсор с измерительным диапазоном от 0 до 100 гПа и является высокоточным прибором для измерений скорости потока от 5 до 100 м/с, совместно с трубкой Пито (рис. 3).



Рис. 3. Дифференциальный манометр Testo 521–1

Для точного измерения скорости потока в диапазоне от 1 до 12 м/с можно также использовать внешний зонд давления 100 Па, подключив его к прибору.

#### **Особенности дифференциального манометра Testo 521–1:**

- встроенный сенсор дифференциального давления с температурной компенсацией и погрешностью 0,2% от полной шкалы;
- 2 дополнительных разъема для внешних зондов давления, температуры, тока/напряжения;
- расчет скорости потока и объемного расхода;
- расчет среднего значения по времени и точкам замеров;
- компенсация плотности;
- возможно подключение к прибору 2-х интерфейсов (вывод через 4 до 20 мА);
- 1 аналоговый сигнал на интерфейс;
- градуировка аналоговых сигналов в приборе;
- подключение трансмиттера с питанием от прибора Testo 521–1;

Основными областями применения и измерений являются системы кондиционирования воздуха/вентиляции. Диапазоны измеряемого давления составляют 0 до 100 гПа/0...2,5 гПа [8].

До проведения замеров можно задать ряд параметров, влияющих на результаты измерения:

- температуру;
- относительную влажность;
- абсолютное давление;
- поперечное сечение;
- коэффициент компенсации;

– коэффициент трубки Пито.

Прибор позволяет задавать время, промежуток, количество измерений и запустить автоматическое сохранение данных при проведении замеров. Все измеренные данные сохраняются во внутренней памяти прибора, но они также могут быть переданы сразу в электронную вычислительную систему или на принтер.

**Программный комплекс обеспечения взаимосвязи измерительных приборов с современными электронными вычислительными системами.** Дифференциальный манометр соединялся с электронно-вычислительной системой посредством стандарта RS232. Считывание, обработку и выдачу результатов обеспечивал программный комплекс Comfort Software 3.4 (рис. 4). Он позволяет на прямую в режиме реального времени снимать измеряемые показатели и записывать их в тело программы

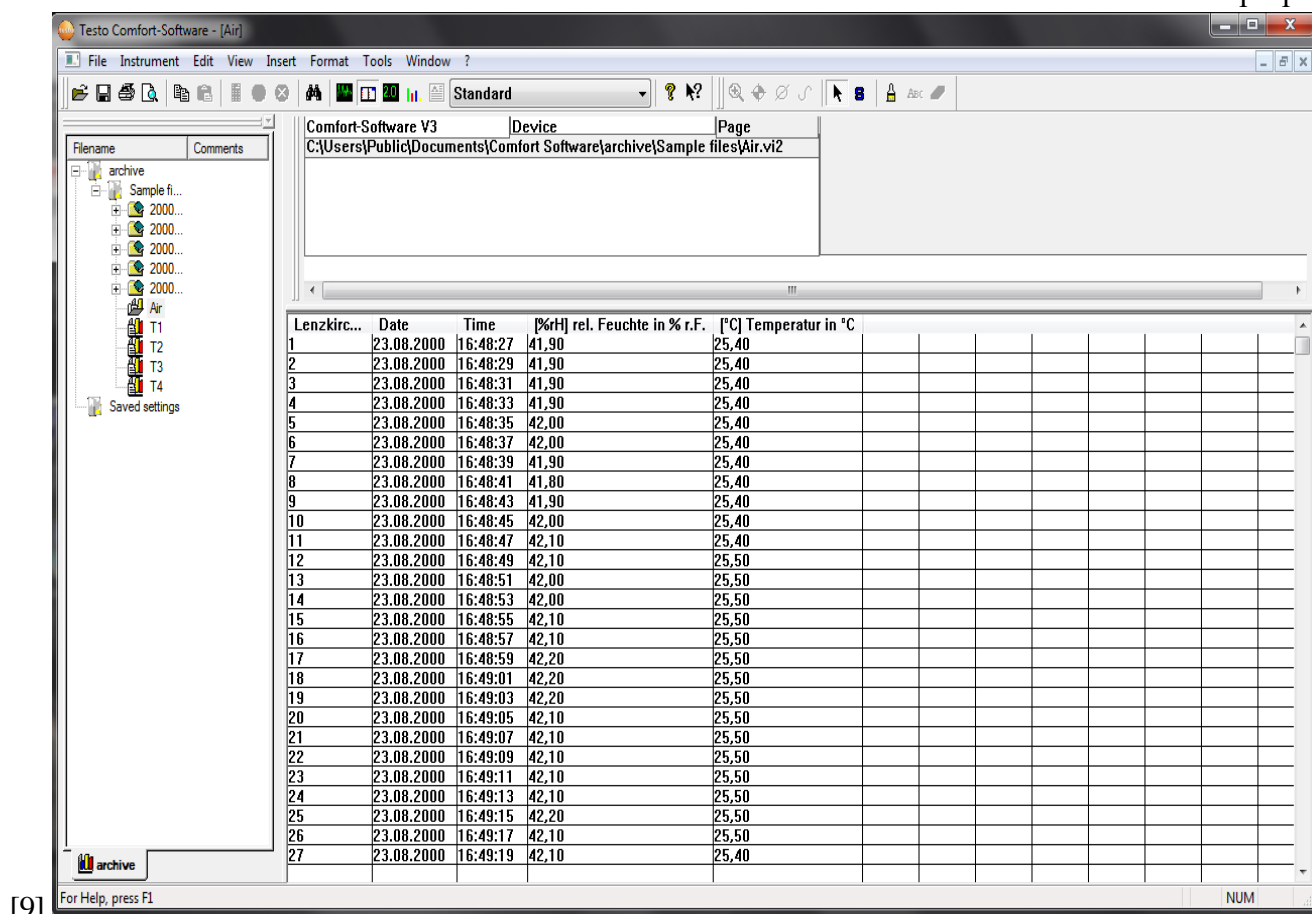


Рис. 4. Интерфейс программы Comfort Software 3.4

В ходе экспериментов по изучению аэродинамических параметров циклонных аппаратов было произведено более 1260 замеров, получено и обработано более 3780 значений данных. Обработка такого массива данных без специального программного обеспечения и интерфейса взаимодействия измерительного прибора с электронно-вычислительной системой весьма затруднительна.

Для сравнения аэродинамических характеристик циклонных аппаратов разной геометрической формы на установке был проведён следующий эксперимент. Давления и скорости воздушного потока входного и выходного патрубков циклонов были измерены на участках с расположением мерных сечений на расстояниях, не превышающих шести гидравлических диаметров  $D_h$ , м за местом возмущения потока (отводы, шиберы, диафрагмы и т. п.) и не

превышающих двух гидравлических диаметров перед ним. Местоположения измеряемых точек давлений и скоростей, их количество устанавливались в зависимости от формы и размера мерного круглого сечения в соответствии с ГОСТ 12.3.018–79 (рис. 5а, б).

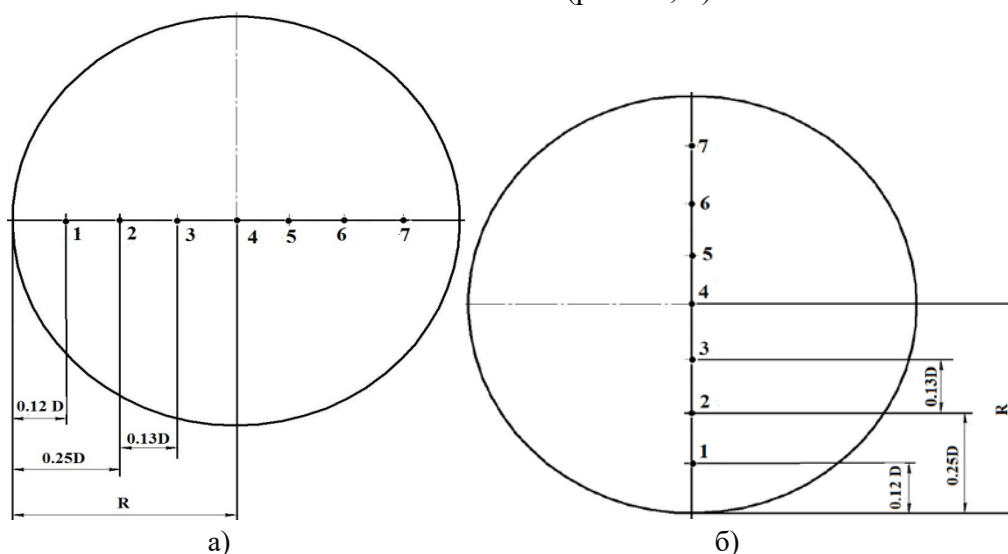


Рис. 5. Схема расположения точек измерения давлений и скоростей входного патрубка циклонов

Так как патрубок исследуемых аппаратов имеет диаметр 200 мм, то основные измерительные точки будут установлены на расстояниях  $0,12D$  (1) от стенок патрубка и на расстоянии  $0,5D$  (4). Для надежности эксперимента были дополнительно добавлены еще 4 точки, которые находятся на расстоянии  $0,25D$  (2, 6) и  $0,38D$  (3, 7).

В патрубках экспериментальной установки были выполнены отверстия  $D_{отв} = 20$  мм. В них с помощью силиконовых пробок устанавливались трубки Пито, которые подключались к двум дифференциальным манометрам Testo 521–1. После этого для вытяжки воздушного потока приводили в действие радиальный вентилятор РОВЕН VCZpl–250. Режимы работы вентилятора меняли с помощью электронного блока управления. По истечению 15–20 мин работы вентилятора в установленном режиме проводились замеры на входном и выходном патрубках установки полного, статического и динамического давления, расхода, скорости воздушного потока. Измерения проводились 30 раз при режимах работы вентилятора ( $n_1=1710$  об/мин,  $n_2=2250$  об/мин,  $n_3=2850$  об/мин), что соответствует объемному расходу на входе аппарат в «ЦН–15у–300» ( $n_1=424$  м<sup>3</sup>/ч,  $n_2=558$  м<sup>3</sup>/ч,  $n_3=685$  м<sup>3</sup>/ч) и «ЦОК–200–300» ( $n_1=516$  м<sup>3</sup>/ч,  $n_2=660$  м<sup>3</sup>/ч,  $n_3=814$  м<sup>3</sup>/ч). Измерения по сечениям на входе и выходе циклонных аппаратов «ЦН–15у–300» и «ЦОК–200–300» проводились в 7 точках.

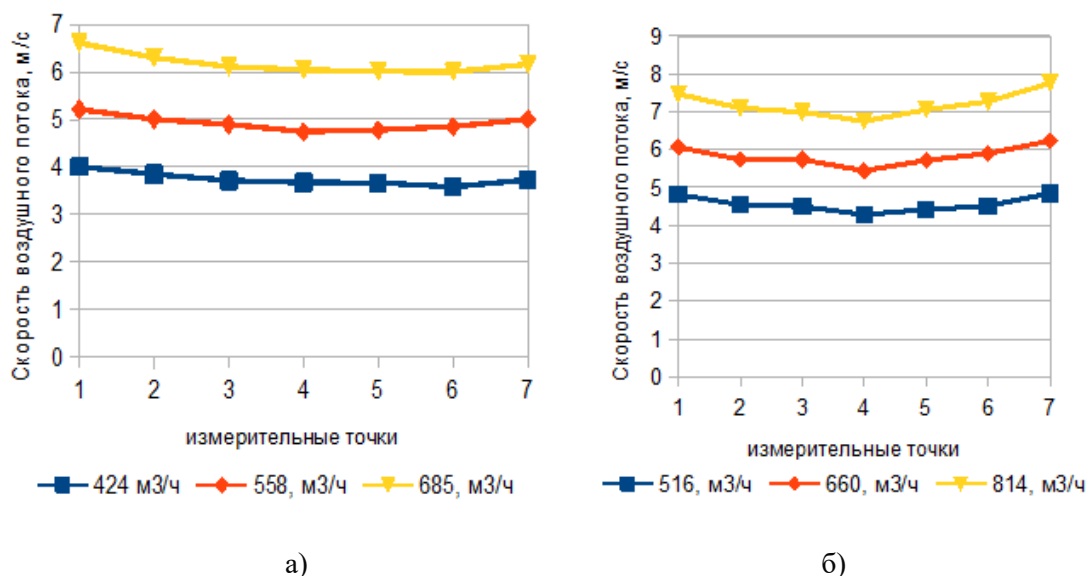


Рис. 6. Скорость воздушного потока во входном патрубке циклона «ЦН15у-300» (а) и циклона «ЦОК-200-300» (б) при различных режимах работы вентилятора

**Экспериментальная часть и численные исследования.** Полученные результаты в экспериментах были обработаны и представлены в виде графиков (рис. 6–11). На рис. 6 показаны результаты измерений скоростей воздушного потока во входном патрубке аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» на разных режимах работы вентилятора. Как видно из рис. 6, величины скорости во входном трапецевидном патрубке «ЦОК-200-300» несколько выше, чем на входе цилиндрического циклона, что обуславливает более высокое значение центробежной силы на первых витках траектории движения воздуха в аппарате.

На рис. 7 и 8 показаны результаты измерений динамических давлений воздушного потока во входном и выходном патрубках аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» на разных режимах работы вентилятора.

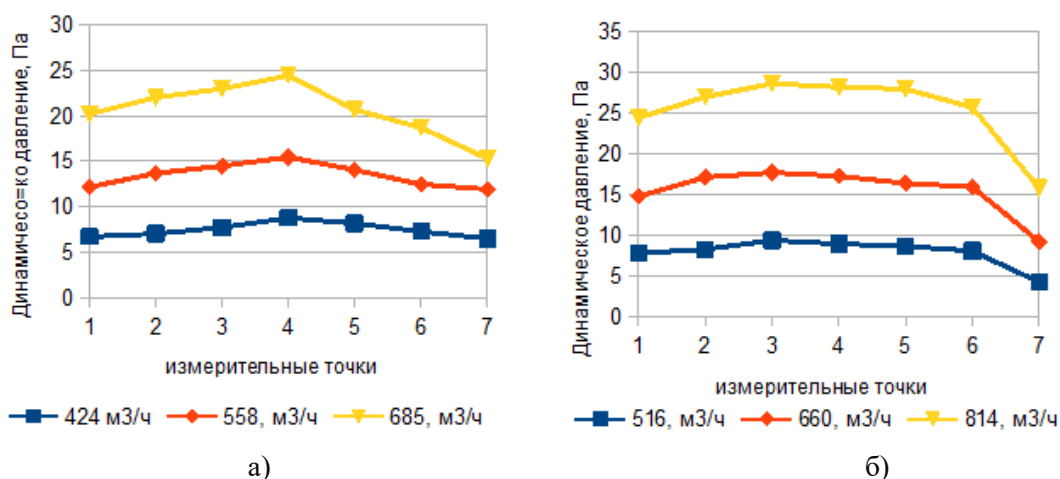


Рис. 7. Динамическое давление воздушного потока во входном патрубке циклона «ЦН15у-300» (а) и циклона «ЦОК-200-300» (б) при различных режимах работы вентилятора

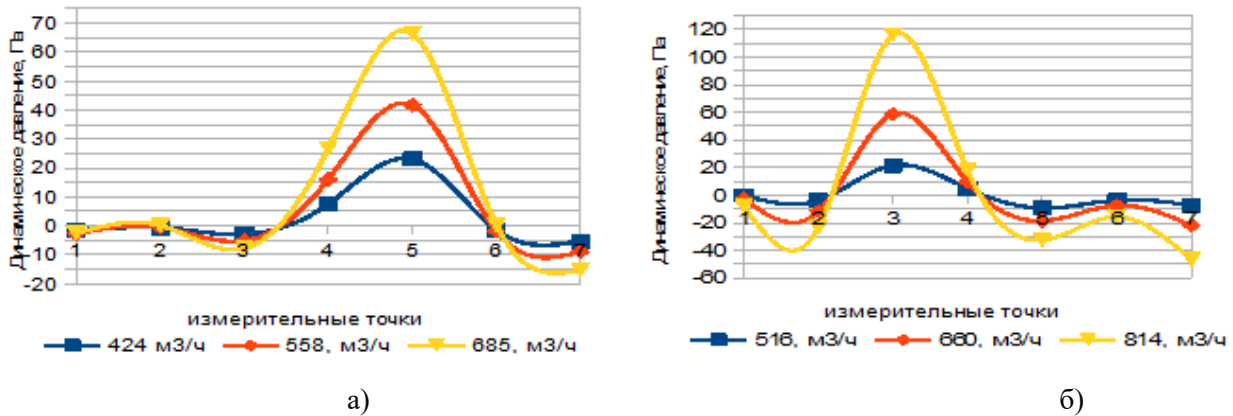


Рис. 8. Динамическое давление воздушного потока на выходном патрубке циклона «ЦН15у-300» (а) и циклона «ЦОК-200-300» (б) при различных режимах работы вентилятора

Значения динамических давлений на входном и выходном патрубках «ЦОК-200-300» значительно выше (на 20–50 Па), чем у цилиндрического циклона ЦН-15у-300. Максимум значений на входе в аппараты наблюдается в 4-ой измерительной точке.

На рис. 9 и 10 показаны результаты измерений статических давлений воздушного потока во входном и выходном патрубках аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» на разных режимах работы вентилятора.

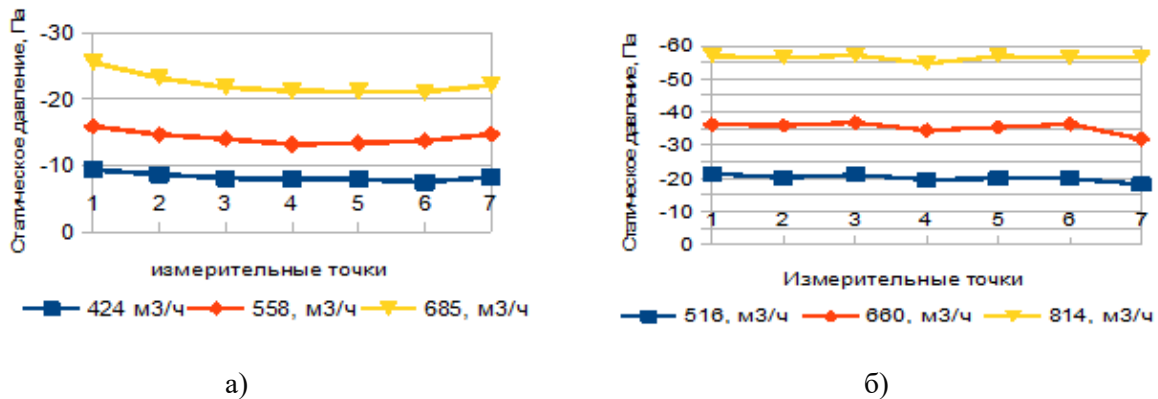


Рис. 9. Статическое давление воздушного потока во входном патрубке циклона «ЦН15у-300» (а) и циклона «ЦОК-200-300» (б) при различных режимах работы вентилятора

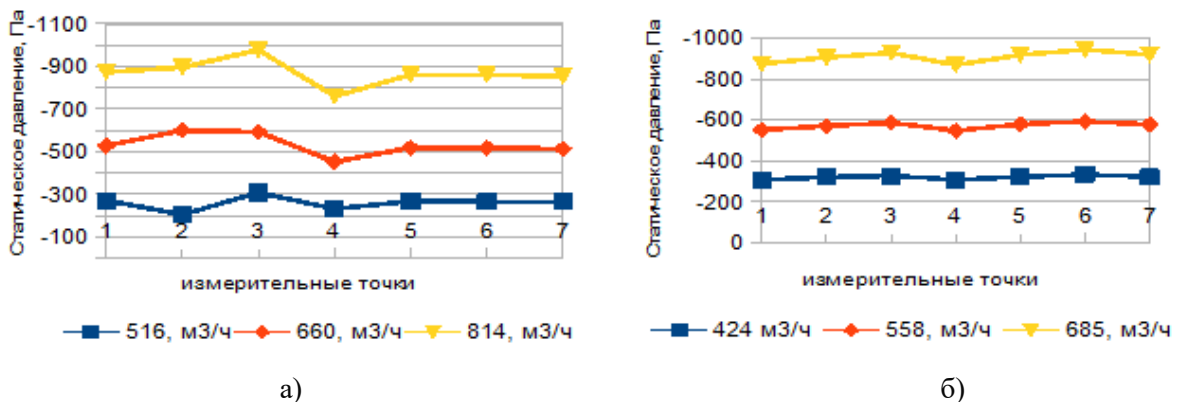


Рис. 10. Статическое давление воздушного потока на выходном патрубке циклона «ЦН15у-300» (а) и циклона «ЦОК-200-300» (б) при различных режимах работы вентилятора



На рис. 11 и 12 показаны результаты измерений полных давлений воздушного потока во входном и выходном патрубках установки на разных режимах работы вентилятора.

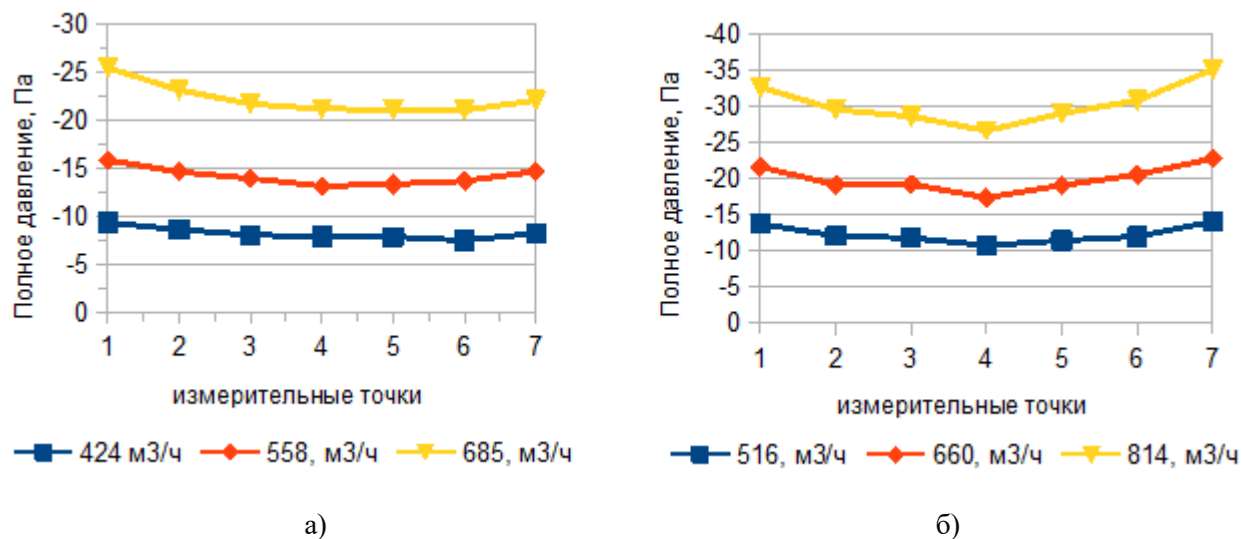


Рис. 11. Полное давление воздушного потока во входном патрубке циклона «ЦН15у-300» (а) и циклона «ЦОК-200-300» (б) при различных режимах работы вентилятора

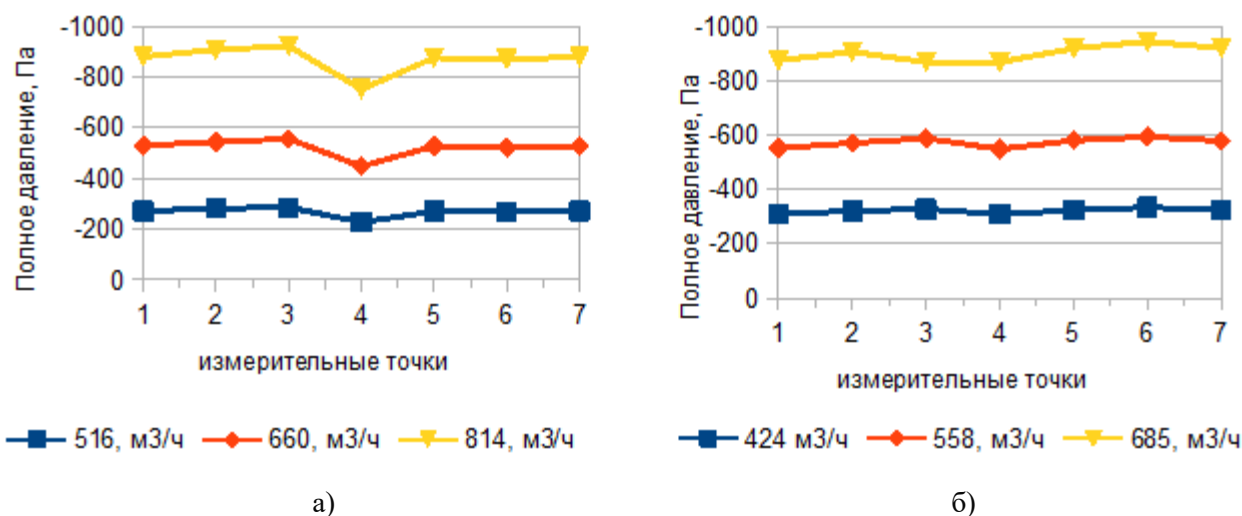


Рис. 12. Полное давление воздушного потока на выходном патрубке циклона «ЦН15у-300» (а) и циклона «ЦОК-200-300», (б) при различных режимах работы вентилятора

### Выводы.

1. Величины скорости во входном трапецевидном патрубке «ЦОК-200-300» несколько выше, чем на входе цилиндрического циклона ЦН-15у-300, что обуславливает более высокое значение центробежной силы на первых витках траектории движения воздуха в аппарате.

2. Значения динамических давлений во входном и выходном патрубках «ЦОК-200-300» значительно выше (на 20–50 Па), чем у цилиндрического циклона ЦН-15у-300. Максимум значений на входе в аппараты наблюдается в 4-ой измерительной точке. Что касается формы изменения динамического давления на выходе аппаратов в зависимости от измерительной точки, то они подобные, но имеют смещенные точки максимумов, что связано с разной структурой закрученных воздушных потоков, выходящих из аппаратов.

3. Характер изменения статического и полного давлений показывает, что в выходном

патрубке циклона образуется разряжение. Это объясняется тем, что исследуемые центробежные аппараты работают не на нагнетание, а на вытяжку (согласно схемы установки). Это явление объясняется вихреобразным потоком не только в теле аппаратов «ЦН–15у–300» и «ЦОК–200–300», но и на выходе установки, при котором давление распределяется по периферии вихря.

### Библиографический список

1. Потёмкина, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования влияния глубины погружения выхлопного патрубка на аэродинамические свойства и эффективность циклонных аппаратов / А. В. Потемкина, Е. С. Лукаш. // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 4 (47). — С. 526–533.
2. Y. Buligin et al., Features of Velocity and Pressure Fields Formation in the Centrifugal Dust Collector 2014, Applied Mechanics and Materials, Volume 698.
3. V.Ch. Meskhi et al., Cyclone with Controlled Parameters and Self-Emptying Bin for Air Dedusting in Machine Building Plants 2014, Applied Mechanics and Materials, 682, 46–52.
4. Пылеулавливатель : патент 2506880 Рос. Федерация: А47L9/16/ Б. Ч. Месхи, А. Н. Михайлов, Ю. И. Булыгин, Л. Н. Алексеенко, О. В. Денисов, О. С. Панченко. — № 2012155164/12; заявл. 18.12.12; опубл. 20.02.14, Бюл. № 5. — 7с.
5. Установка для пылеулавливания : патент 2557741 Рос. Федерация: А47L9/16/ Б. Ч. Месхи, Ю. И. Булыгин, А. Н. Легконогих, Л. Н. Алексеенко, Д. А. Корончик, О. В. Денисов, А. А. Абузьяров. — № 2014136881/12; заявл. 11.09.14; опубл. 27.07.15, Бюл. № 2. — 4с.
6. Булыгин, Ю. И. Модернизация экспериментальных установок для сравнительных параллельных испытаний центробежных пылеуловителей / Ю. И. Булыгин, М. В. Варданян, И. С. Купцова // Повышение международной конкурентоспособности российской инновационной продукции и технологий предприятий ростовской области : сб. трудов I Междунар. науч. Конф. — Ростов-на-Дону, 2016. — С. 28–33.
7. Трубки напорные модификации НИОГАЗ и ПИТО: Руководство по эксплуатации / Российский центр испытаний и сертификации. — Москва. — 2001. — 11с.
8. Инструкция по эксплуатации Testo 521/526 / Российское отделение Testo-AG. — Москва :Тесто Рус, 2016. — 8с.
9. Руководство пользователя «Программное обеспечение ComSoft 3.4» / Российское отделение Testo-AG. — Москва : Тесто Рус, 2016. — 14с.