

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>  
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 4 / 2025, Vol. 12, Iss. 4 <https://resources.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/15NZOR425.pdf>

DOI: 10.15862/15NZOR425 (<https://doi.org/10.15862/15NZOR425>)

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические, географические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Затонский, А. В. Определение фактической аэродинамической характеристики вентилятора главной вентиляционной установки рудника / А. В. Затонский, О. В. Морозова // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://resources.today/PDF/15NZOR425.pdf>. DOI: 10.15862/15NZOR425.

**For citation:**

Zatonskii A.V., Morozova O.V. Determination of the real mine main ventilation unit fan aerodynamic characteristics. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(4): 15NZOR425. Available at: <https://resources.today/PDF/15NZOR425.pdf>. DOI: 10.15862/15NZOR425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 622.23.05+697.953+307.447.3

**Затонский Андрей Владимирович**

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Березники, Россия  
Заведующий кафедрой «Автоматизации технологических процессов»  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [z Xenon@narod.ru](mailto:z Xenon@narod.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=158505](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=158505)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56069394200>

**Морозова Ольга Владимировна**

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Березники, Россия  
Старший преподаватель кафедры «Химической технологии и экологии»  
E-mail: [olgakhivrenko@yandex.ru](mailto:olgakhivrenko@yandex.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=653984](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=653984)

## Определение фактической аэродинамической характеристики вентилятора главной вентиляционной установки рудника

**Аннотация.** Поставлена задача исследования режимов воздушораспределения на Усть-Яйвинском руднике ПАО «Уралкалий» в г. Березники Пермского края. Обоснована невозможность непосредственного определения режимов по углу установки лопаток вентилятора из-за конструктивных особенностей. Описана методика исследования параметров главной вентиляционной установки, заключающаяся в определении соответствия характеристик сети вентиляции и лопастного насоса в ходе экспериментов. Обоснованы измеряемые в процессе эксперимента величины: барометрическое давление, статистическое давление на всасе и выхлопе вентилятора, площадь поперечного сечения вентиляционного канала, средняя скорость потока воздуха, а также положение шлюзовых ворот, используемое в эксперименте в качестве возмущения. Скорость потока определялась с усреднением по верхней и нижней части сечения канала. Определены места замеров, а также места возможных потерь воздушных потоков. Проведены эксперименты с главной вентиляционной установкой в нормальном и реверсивном режимах. Построены аэродинамические характеристики вентилятора в нормальном и реверсивном режимах. На их основе установлены зависимости характеристики вентилятора

от положения лопаток и расчетные углы установки лопаток в разных режимах, что позволяет в дальнейшем обоснованно производить регулирование подачи воздуха в шахтное поле или создание общешахтной депрессии. Показано, что фактическая аэродинамическая характеристика вентилятора в данных условиях эксплуатации не соответствует предоставленной изготовителем, следовательно, авторские подход и методика эксперимента могут быть использованы для уточнения характеристик других подобных вентиляционных систем.

**Ключевые слова:** рудник; добыча калийной руды; рудничная вентиляция; характеристика вентилятора; эксперимент; воздушные потоки; управление

## Введение

Для обеспечения населения планеты продуктами питания необходимо выращивать различные растительные культуры. В целях увеличения их урожайности, их устойчивости к различным болезням и лежкости плодов необходимо вносить различные органические и минеральные (в том числе комплексные) удобрения. К основным минеральным удобрениям относят калий, азот и фосфор [1].

Калий поступает в почву в виде хлористого калия. Примерно треть мировой добычи происходит подземным способом из калийно-магниевых руд на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (Пермский край). Далее руда в процессе обогащения на сильвинитовых фабриках превращается в гранулированный либо мелкозернистый продукт с содержанием полезного элемента до 96–98 % [2].

Подземная выемка сильвинита производится посредством механизированных комбайновых комплексов — горно-выемочных машин Урал-20Р, КПО-10,5, Урал-61 и других. Для бесперебойного, безопасного и эффективного процесса добычи руды необходимо осуществлять вентиляцию подземных горных выработок, в том числе забоя. Вентиляция осуществляется посредством общешахтной депрессии при помощи воздухоподводящего ствола, воздухоотводящего ствола и главной вентиляторной установки. В холодное время года воздух, подаваемый в шахту, необходимо подогревать до необходимых температур [3]. Эта функция возложена на главную калориферную установку.

Проветривание горных выработок является необходимым как для обеспечения дыхания людей под землей, так и для обеспечения безопасности производства работ. Состояние рудничной атмосферы должно исключать превышение допустимых концентраций опасных газов. Превышение допустимого количества влаги в ней вызывает коррозию конструкций, особенно в калийных шахтах, где увлажнение вызывает образование агрессивных соединений, а сами породы насыщаются водой и меняют свойства. Поэтому расчеты систем проветривания, основывающиеся на аэродинамических характеристиках лопастных насосов, являются важными и практически значимыми.

Задачей данной статьи является определение фактической аэродинамической характеристики главной вентиляторной установки (ГВУ) рудника на базе вентиляторных агрегатов Zitron 1-52-9500/10 в зимний период. Аэродинамическая характеристика вентиляторов, представленная заводом-изготовителем, содержит номера положений лопаток вентилятора. При этом угол поворота лопаток в каждом из положений не известен. Непосредственно измерить его невозможно из-за сложной формы лопаток [4].

Необходимо определить соответствие номеров положения и углов поворота лопаток вентилятора. Исследование производилось на базе Усть-Яйвинского рудника Третьего Березниковского калийного производственного управления ПАО «Уралкалий» (г. Березники).

Очевидными задачами исследования являются:

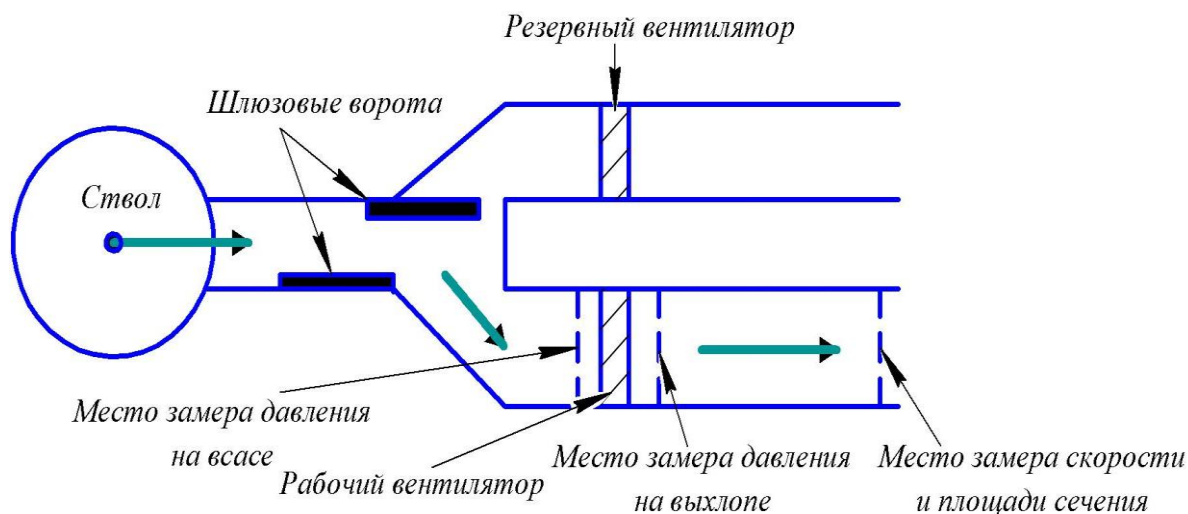


- статистическое давление на выхлопе вентилятора, Па;
- площадь поперечного сечения вентиляционного канала в месте выполнения измерений скорости воздуха, м<sup>2</sup>;
- средняя скорость потока воздуха в вентиляционном канале на всасе и на выхлопе вентилятора, м/с.

Для определения аэродинамической характеристики вентиляторной установки необходимо выполнять замеры напора и производительности вентилятора не менее трех раз с различным аэродинамическим сопротивлением сети на одном угле установки лопаток. Частота вращений вала вентилятора согласовывается со специалистами рудника и не изменяется на период замеров. Угол установки лопаток рабочего колеса изменяется после серии замеров на одном положении.

В некоторых случаях необходимо снизить частоту вращения рабочего колеса ГВУ для недопущения профицита воздуха в горных выработках. Замер скорости воздуха выполняется в вентиляционном канале на выхлопе вентилятора. Для достижения выравнивания полей скорости воздуха замер выполняется на максимальном отдалении от рабочего колеса вентилятора. С целью обвода всего сечения вентиляционного канала, необходимо использовать штангу, на которой крепится анемометр. Замер выполняется не менее 3-х раз, время каждого замера не менее 5 минут.<sup>1</sup>

Депрессия вычисляется как разность полного давления на всасе и на выхлопе вентилятора. Замер давления выполняется при помощи барометров и депрессиомеров. Места замеров скорости воздуха и давления представлены на рисунке 2.



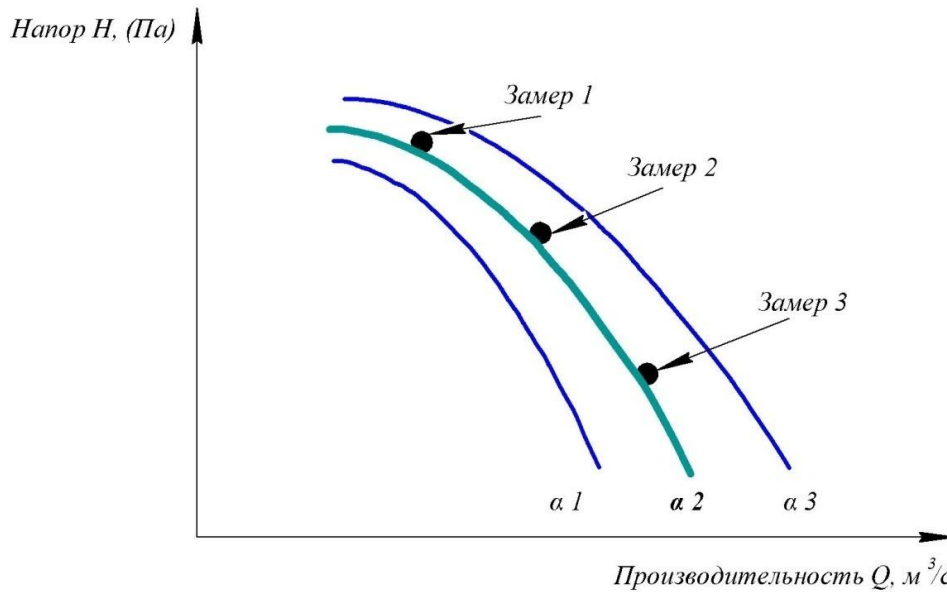
**Рисунок 2.** Места замеров скорости воздуха и давления (составлено авторами)

После выполнения замеров полученные рабочие точки наносятся на аэродинамическую характеристику вентилятора, соответствующую рабочей частоте вращения рабочего колеса. Аэродинамическая характеристика вентилятора представлена на рисунке 3.

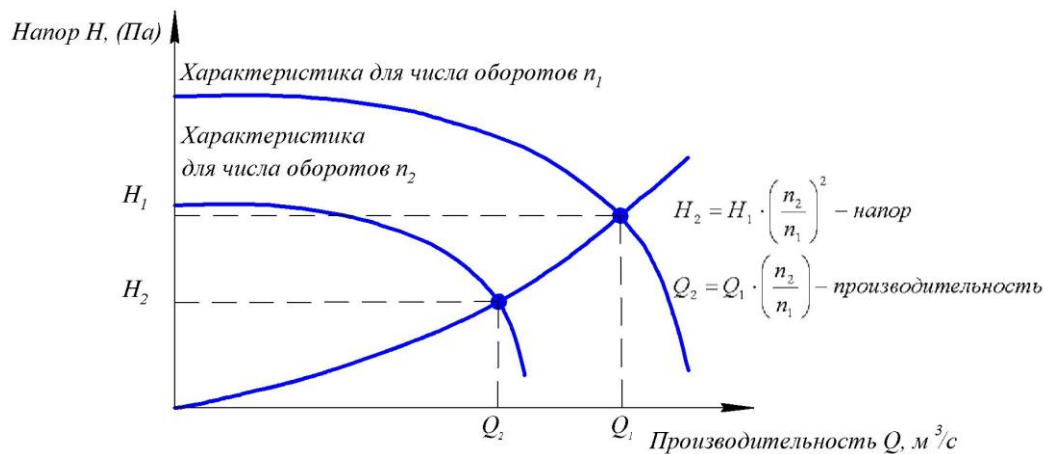
Для представления всех точек на одной аэродинамической характеристике вентилятора необходимо применить закон подобия вентиляторов.

Закон подобия вентиляторов [7] представлен на рисунке 4.

<sup>1</sup> Регламент технического производственного процесса «Проветривание горных выработок Усть — Яйвинского рудник БКПРУ-3 ПАО «Уралкалий», 2021 г. — 148 с.



**Рисунок 3.** Аэродинамическая характеристика вентилятора (составлено авторами на основании статистических данных)



**Рисунок 4.** Закон подобия вентилятора (составлено авторами на основании статистических данных)

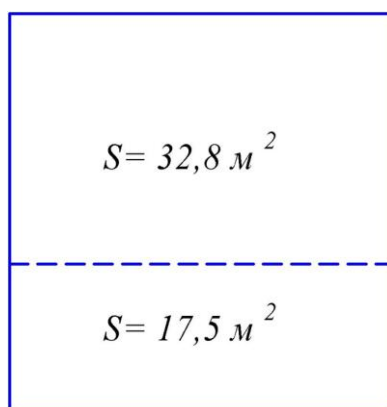
Вместе с ручными замерами параметров работы главной вентиляторной установки необходимо фиксировать показания датчиков расхода и напора ГВУ, которые выводятся на монитор в диспетчерской рудника.

### Проведение эксперимента в нормальном режиме

Частота вращения рабочего колеса главной вентиляторной установки ZitronZVN 1-52-9500/10 выставлены на 250 об/мин. Аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети изменялось за счет регулировки открытия шлюзовых ворот вентиляционного канала резервной ГВУ (закрыт, открыт на 20%, открыт на 80%).

Для каждого положения лопаток вентилятора было выполнено по три замера с изменением аэродинамического сопротивления. Общее кол-во замеров — 24.

Замеры выполнены в вентиляционном канале ГВУ с площадью сечения 50,3 м<sup>2</sup>. Площадь нижней части сечения канала ГВУ = 17,5 м<sup>2</sup>, площадь верхней части сечения канала ГВУ = 32,8 м<sup>2</sup>.



**Рисунок 5.** Сечение вентиляционного канала ГВУ (составлено авторами)

Расчет замеренной производительности выполнялся по формуле [8]:

$$Q_{\text{зам}} = S_{\text{низ}} \cdot V_{\text{низ.ср.}} + S_{\text{верх}} \cdot V_{\text{верх.ср.}},$$

где:

$S_{\text{низ}} = 17,5 \text{ м}^2$  — площадь нижней части сечения канала ГВУ;

$V_{\text{низ.ср.}}$  — скорость воздуха в нижней части сечения канала ГВУ, м/с;

$S_{\text{верх}} = 32,8 \text{ м}^2$  — площадь верхней части сечения канала ГВУ, м/с;

$V_{\text{верх.ср.}}$  — скорость воздуха в верхней части сечения канала ГВУ, м/с.

Скорость воздуха в нижней и верхней частях сечения канала ГВУ вычислялись как среднее арифметическое первого и второго замеров.

Расчет замеренного напора главной вентиляторной установки выполнялся по формуле [9]:

$$H_{\text{зам}} = H_{\text{выхл}} - H_{\text{всас}}, \text{ Па},$$

где:

$H_{\text{выхл}}$  — замеренное значение давления на выхлопе вентилятора, Па;

$H_{\text{всас}}$  — замеренное значение давления на всасе вентилятора, Па.

Расчет пересчитанной производительности и пересчитанного напора выполнялись по закону подобия вентиляторов? представленном на рисунке 4:

$$Q_{\text{пер}} = Q_{\text{зам}} \cdot \frac{n_0}{n},$$

$$H_{\text{пер}} = H_{\text{зам}} \cdot \left( \frac{n_0}{n} \right)^2,$$

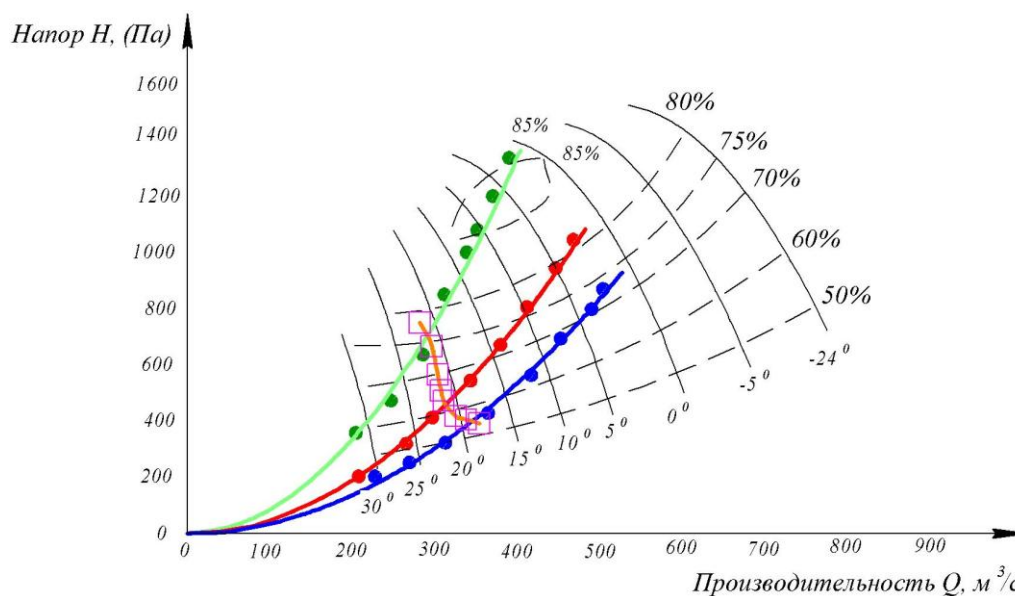
где:

$n_0 = 250$  об/мин — значение частоты вращения рабочего колеса для перерасчета;

$N$  — частота вращения рабочего колеса ГВУ, об/мин.

На аэродинамическую характеристику ГВУ нанесены рабочие точки, пересчитанные к частоте вращения вентилятора в 250 об/мин., в зависимости от положения угла наклона лопаток по трем аэродинамическим характеристикам сети: шлюзовые ворота закрыты, шлюзовые ворота открыты на 20 %, шлюзовые ворота открыты на 80 %.

На рисунке 6. нанесены характеристики сети для трех положений шлюзовых ворот. Они получены путем пересчета среднего сопротивления всех замеренных точек для каждого положения шлюзовых ворот по формуле  $H = RQ^2$  [10].



**Рисунок 6.** Результаты экспериментальных замеров аэродинамической характеристики главной вентиляторной установки ZitronZVN 1-52-9500/10 в нормальном режиме работы (составлено авторами на основании экспериментальных данных)

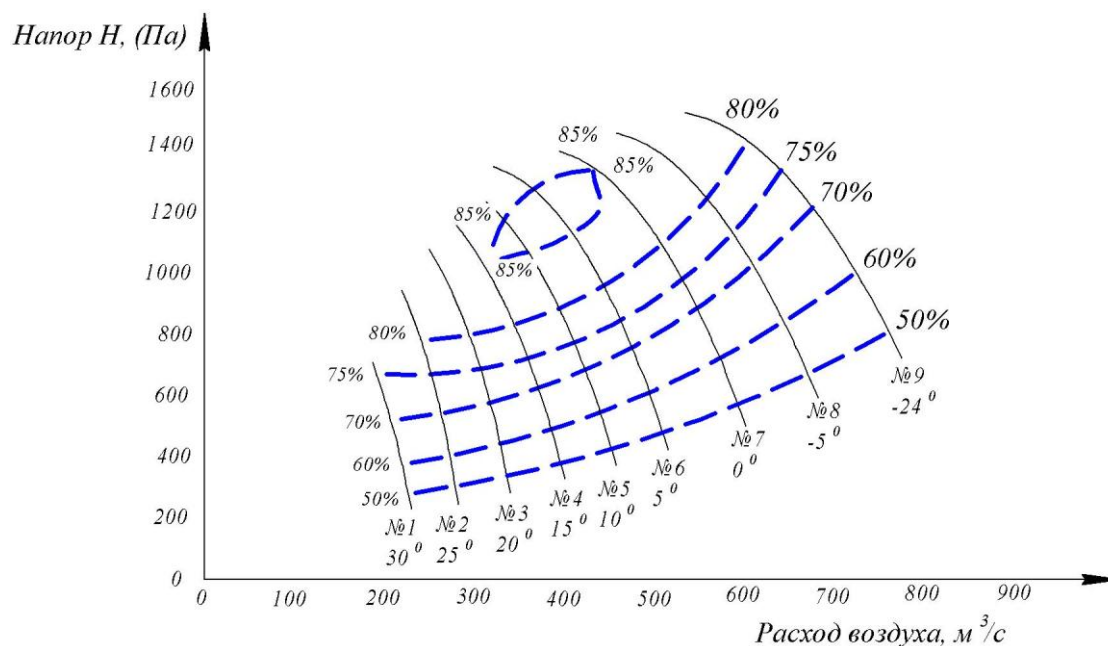
На аэродинамическую характеристику нанесена кривая, которая соответствует положению угла наклона лопаток в 19 градусов. Проводилась серия замеров при частоте вращения вентилятора в 250 об/мин и разной степени открытия шлюзовых ворот (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 40 %, 60 %), при открытии которых происходит искажение поля скоростей в вентиляционном канале ГВУ поле скоростей распределено равномерно по сечению вентиляционного канала. При открытии шлюзовых ворот более чем на 25 % кривая, соответствующая углу поворота лопаток в 19 градусов, изменяет свой характер, в силу того что происходит перераспределение поля скоростей воздуха и как следствие из-за неравномерности происходит изменение характеристики ГВУ от заводской.

Рабочие точки вентилятора, замеренные при закрытых и открытых на 20 % шлюзовых воротах, на аэродинамической характеристике вентилятора, располагаются без отклонений на характеристике аэродинамической сети и в близости от кривых, которые соответствуют положениям углов поворота лопаток.

Рабочие точки вентилятора, замеренные при открытых на 80 % шлюзовых воротах, не совпадают с кривыми на аэродинамической характеристике. Такое расположение точек подтверждено детальным исследованием угла поворота лопаток в 19 градусов.

Для положения лопаток ГВУ менее -5 градусов измерения не проводились, это связано с тем, что текущая характеристика сети не позволяет выполнить такие замеры, так как при уменьшении угла поворота лопаток менее -5 градусов происходит срыв потока и аварийная остановка вентилятора. Данные замеры возможны только при дальнейшем развитии рудника, увеличении требуемого количества воздуха и сопротивлении сети.

Построенная аэродинамическая характеристика вентилятора ZitronZVN 1-52-9500/10 с нанесенными рабочими точками соответствует фактическим аэрологическим параметрам работы вентилятора.



**Рисунок 7.** Аэродинамическая характеристика ГВУ ZitronZVN 1-52-9500/10 (700 об/мин) (составлено авторами на основании экспериментальных данных)

На рисунке 7 представлена аэродинамическая характеристика ГВУ, на которой отображены номера положений лопаток вентилятора. По результатам настройки энкодера рабочий диапазон составляет 54 градуса.

Значения положений установки лопаток рабочего колеса соответствуют углам установки лопаток:

- 1 положение угла лопаток — 30°;
- 2 положение угла лопаток — 24°;
- 3 положение угла лопаток — 18°;
- 4 положение угла лопаток — 12°;
- 5 положение угла лопаток — 6°;
- 6 положение угла лопаток — 0°;
- 7 положение угла лопаток — -8°;
- 8 положение угла лопаток — -16°;
- 9 положение угла лопаток — -24°.

### Проведение эксперимента в реверсивном режиме

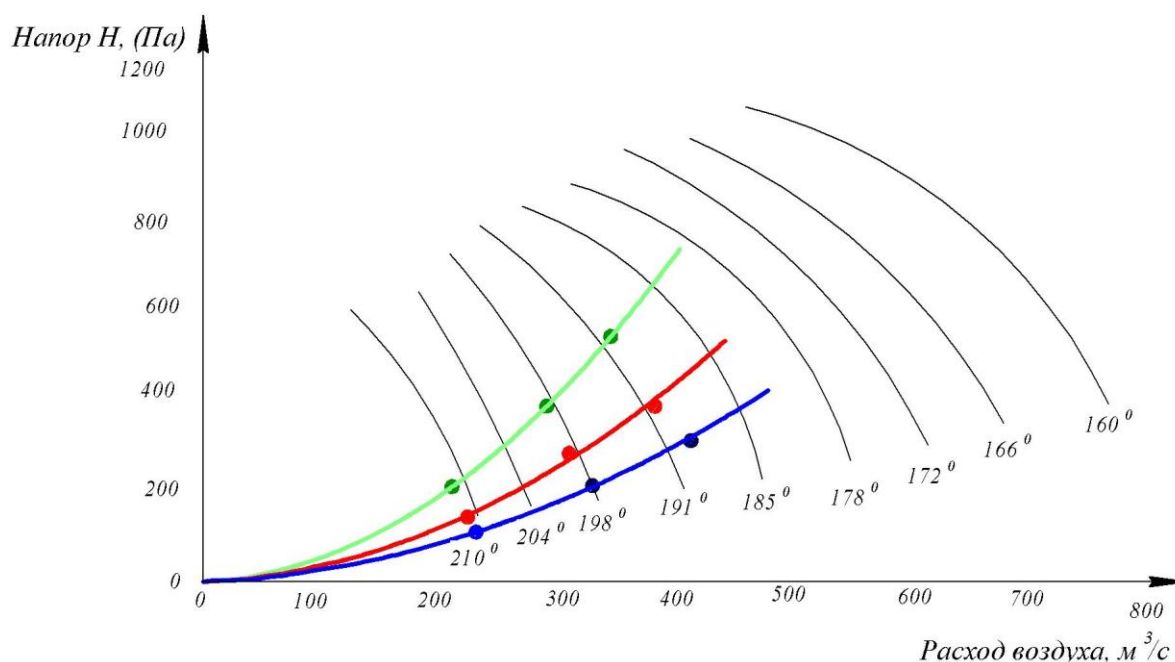
Частота вращения рабочего колеса главной вентиляторной установки ZitronZVN 1-52-9500/10 выставлены на 250 об/мин. Аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети изменялось за счет регулировки открытия шлюзовых ворот вентиляционного канала резервной ГВУ (закрыт, открыт на 20 %, открыт на 50 %).

Для каждого положения лопаток вентилятора было выполнено по три замера с изменением аэродинамического сопротивления.

Замеры выполнены в вентиляционном канале ГВУ с площадью сечения  $50,3 \text{ м}^2$ . Площадь нижней части сечения канала ГВУ =  $17,5 \text{ м}^2$ , площадь верхней части сечения канала ГВУ =  $32,8 \text{ м}^2$ .

На аэродинамическую характеристику ГВУ нанесены рабочие точки, пересчитанные к частоте вращения вентилятора в 250 об/мин., в зависимости от положения угла наклона лопаток по трем аэродинамическим характеристикам сети: шлюзовые ворота закрыты, шлюзовые ворота открыты на 20 %, шлюзовые ворота открыты на 50 %.

На рисунке 8. нанесены характеристики сети для трех положений шлюзовых ворот. Они получены путем пересчета среднего сопротивления всех замеренных точек для каждого положения шлюзовых ворот по формуле  $H = RQ^2$ .



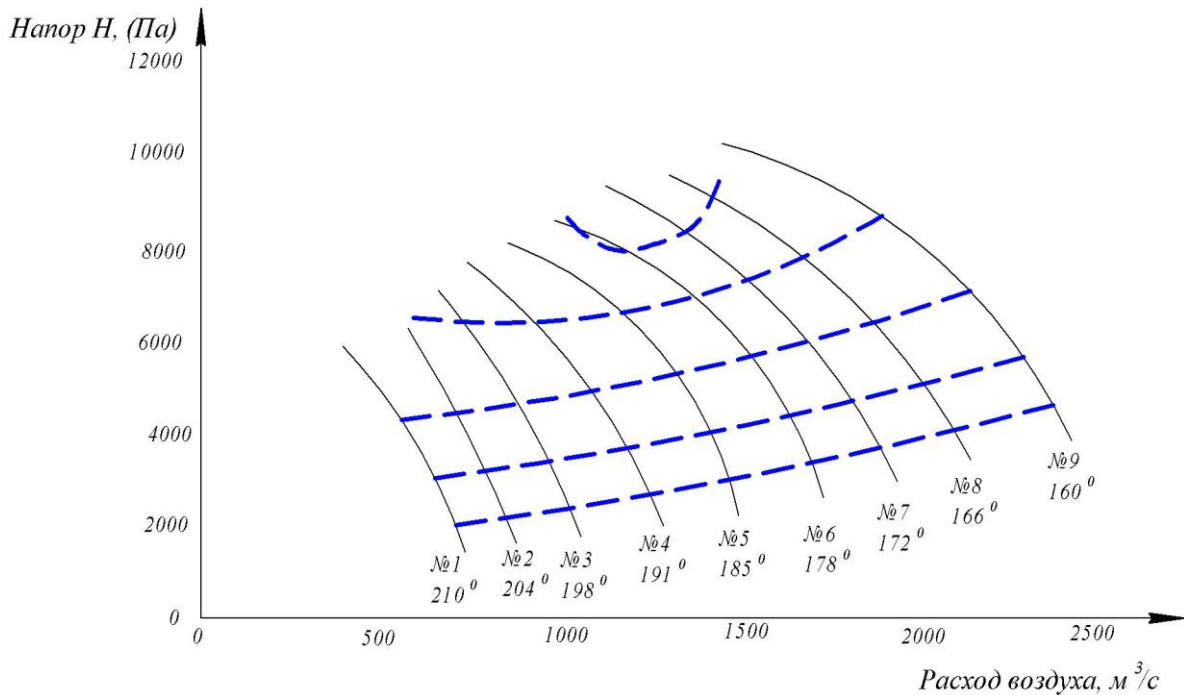
**Рисунок 8.** Результаты экспериментальных замеров аэродинамической характеристики главной вентиляторной установки ZitronZVN 1-52-9500/10 в реверсивном режиме работы (составлено авторами на основании экспериментальных данных)

Рабочие точки вентилятора, замеренные при закрытых, открытых на 20 % и 50 % шлюзовых воротах, на аэродинамической характеристике вентилятора, располагаются без отклонений на характеристике аэродинамической сети и в близости от кривых, которые соответствуют положениям углов поворота лопаток.

Для положения лопаток ГВУ менее 185 градусов измерения не проводились, это связано с тем, что текущая характеристика сети не позволяет выполнить такие замеры, так как при уменьшении угла поворота лопаток менее 185 градусов происходит срыв потока.

Построенная аэродинамическая характеристика вентилятора ZitronZVN 1-52-9500/10 для реверсивного режима работы с нанесенными рабочими точками соответствует фактическим аэрологическим параметрам работы вентилятора.

На рисунке 9 представлена аэродинамическая характеристика ГВУ, на которой отображены номера положений лопаток вентилятора. По результатам настройки энкодера рабочий диапазон составляет 50 градусов.



**Рисунок 9.** Аэродинамическая характеристика ГВУ ZitronZVN 1-52-9500/10 (700 об/мин) (составлено авторами на основании экспериментальных данных)

Значения положений установки лопаток рабочего колеса соответствуют углам установки лопаток:

- 1 положение угла лопаток — 210°;
- 2 положение угла лопаток — 204°;
- 3 положение угла лопаток — 198°;
- 4 положение угла лопаток — 191°;
- 5 положение угла лопаток — 185°;
- 6 положение угла лопаток — 178°;
- 7 положение угла лопаток — 172°;
- 8 положение угла лопаток — 166°;
- 9 положение угла лопаток — 160°.

### Выводы

В ходе исследования главной вентиляторной установки ZitronZVN 1-52-9500/10 в нормальном режиме проветривания установлено соответствие между положениями установки и углами поворота лопаток вентилятора. Разработанная методика измерений может быть применена и на других подобных устройствах, используемых для подачи больших расходов воздуха в ограниченные пространства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Chen C., Tang T., Shi Q., Zhou Z., Fan J. The potential and challenge of microalgae as promising future food sources // Trends in Food Science & Technology. 2022, vol. 126, p. 99–112.
2. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования // Горная промышленность. — 2022. — № 1. — С. 41–50.
3. Земсков А.Н., Лискова М.Ю., Заалишвили В.Б., Шамрин М.Ю. Современные технологические и технические решения при ведении горных работ на калийных рудниках // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2022. — № 2. — С. 284–296.
4. Затонский, А.В. Система автоматизированного управления рециркуляцией воздуха при вентиляции подземных горных выработок в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / А.В. Затонский, О.В. Морозова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2023. — № 6. — С. 168–180.
5. Затонский А.В., Язев П.А. Исследование влияния выбора моделей статистических распределений случайной величины на результаты моделирования горно-выемочных работ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2021. — Т. 21, № 3. — С. 130–137.
6. Шонин О.Б., Пронько В.С. Минимизация потерь в частотно-регулируемом приводе вентиляторов главного проветривания шахт // Глобальная энергия. 2014. № 2(195). С.70–77.
7. Аэродинамические режимы работы систем вентиляции подготовительных выработок / Качурин Н.М., Стась Г.В., Качурин А.Н., Стась В.П. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 3. — С. 85–93.
8. Семин М.А., Мальцев С.В., Колесов Е.В. Исследование влияния аэродинамических процессов в шахтном стволе с канатной арматурой на колебания движущегося скипа // Недропользование XXI век. — 2022. — Т. 22, № 4. — С.192–200.
9. Колесов Е.В., Семин М.А., Казаков Б.П., Князев Н.А. Совершенствование метода расчета коэффициента теплоотдачи шахтного вентиляционного ствола по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2023. — № 3. — С. 57–71.
10. Попов М.Д., Семин М.А., Левин Л.Ю. Анализ воздухораспределения в наклонной горной выработке при наличии интенсивного источника тепловыделения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых — 2024. — № 4. — С. 140–151.

### Zatonskii Andrei Vladimirovich

Perm National Polytechnic Research University, Berezniki, Russia  
E-mail: [z xenon@narod.ru](mailto:z xenon@narod.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=158505](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=158505)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56069394200>

### Morozova Olga Vladimirovna

Perm National Polytechnic Research University, Berezniki, Russia  
E-mail: [olgakhivrenko@yandex.ru](mailto:olgakhivrenko@yandex.ru)

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=653984](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=653984)

## Determination of the real mine main ventilation unit fan aerodynamic characteristics

**Abstract.** The article is about a study of the air distribution modes at the Ust-Yayvinsky mine of PJSC Uralkali in Berezniki, Perm Krai. The impossibility of directly determining the modes by the angle of installation of the fan blades is justified due to the design features. A method for investigating the parameters of the main ventilation system is described, which consists in determining the correspondence between the characteristics of the ventilation network and the vane pump during experiments. The values measured during the experiment are justified: barometric pressure, statistical pressure at the intake and exhaust of the fan, the cross-sectional area of the ventilation duct, the average air flow velocity, as well as the position of the airlock gates used in the experiment as a disturbance. The flow rate was determined by averaging over the upper and lower parts of the channel section. The measuring locations have been determined, as well as the locations of possible air flow losses. Experiments have been carried out with the main ventilation system in normal and reverse modes. The aerodynamic characteristics of the fan in normal and reverse modes are constructed. Based on them, the dependences of the fan characteristics on the position of the blades and the calculated angles of installation of the blades in different modes have been established, which makes it possible to reasonably regulate the air supply to the mine field or create a general depression in the future. It is shown that the actual aerodynamic characteristics of the fan under these operating conditions do not correspond to those provided by the manufacturer, therefore, the author's approach and experimental methodology can be used to clarify the characteristics of other similar ventilation systems.

**Keywords:** mine; mining of potash ore; mine ventilation; fan characteristics; experiment; airflows; control