ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):32-47
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 697.911 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_32

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПНЕВМОСИСТЕМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В.Н. Макаров[1], Е.С. Нурхожаев[2], Н.В. Макаров[1], Р.Г. Ахметов[2]

[1] Уральский государственный горный университет,
Екатеринбург, Россия, e-mail: mnikolay84@mail.ru
[2] АО «Костанайские минералы», Житикара, Республика Казахстан

Аннотация: Энергоэффективность вентиляторных комплексов пневмосистем аспирации и обогащения, разработка методик промышленных испытаний, структурирования издержек, способов и средств их снижения является актуальной задачей повышения конкурентоспособности предприятий горно-металлургического комплекса РФ. Анализ аналогичных исследований показывает, что в них отсутствуют результаты влияния на эффективность вентиляторных комплексов неуправляемой рециркуляции. Технологический аудит пневмосистемы аспирации и обогащения хризотил-асбеста цеха обогащения АО «Костанайские минералы» показал низкую энергоэффективность вентиляторного комплекса, значительный объем неуправляемой рециркуляции воздуха. Установлено существенное влияние взаимного расположения вентиляторов и конструктивных особенностей выходных заслонок, их негерметичности на энергетическую эффективность вентиляторного комплекса. Снижение аэродинамических параметров вентиляторов по отношению к их паспортной характеристике составило: по КПД $\eta_{ст}$ = 13%, по статическому давлению $P_{ст}$ = 23%, по мощности N = 8%. Предложены методика расчета критериев оценки энергоэффективности вентиляторного комплекса и пути ее повышения на базе уравнений материального и энергетического балансов с учетом информационной матрицы, притечек, построения номограмм расхода и потерь энергоносителя. Рассчитано, что теоретически возможно достижение КПД вентиляторного комплекса до значений $\eta_{ВК}$ = = 0,71. По итогам внедрения технических мероприятий по модернизации вентиляторного комплекса пневмосистемы аспирации и обогащения цеха обогащения АО «Костанайские минералы» его энергоэффективность была увеличена на 24% до $\eta_{ВК}$ = 0,5, что позволило сократить количество работающих вентиляторов с 12 до 10, обеспечив экономию электроэнергии 2,5 млн кВт/год.

Ключевые слова: вентиляторный комплекс, аэродинамика, расход, депрессия, критерии энергоэффективности, материальный баланс, энергетический баланс, рециркуляция.

Для цитирования: *Макаров В. Н., Нурхожаев Е. С., Макаров Н. В., Ахметов Р. Г.* Экспериментальные исследования и методы повышения энергоэффективности вентиляторных комплексов пневмосистем на предприятиях горно-металлургического комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 32–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_32.

Experimental research and methods for increasing the energy efficiency of ventilation systems of pneumatic systems at enterprises of the mining and metallurgical complex

V.N. Makarov[1], E.S. Nurkhozhaev[2], N.V. Makarov[1], R.G. Akhmetov[2]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: mnikolay84@mail.ru
[2] JSC «Kostanay Minerals», Zhitikara, Republic of Kazakhstan

Abstract: Energy efficiency of ventilation systems of pneumatic aspiration and enrichment systems, development of industrial testing methods, structuring of costs, methods and means of their reduction is an urgent task of increasing the competitiveness of enterprises of the mining and metallurgical complex of the Russian Federation. An analysis of similar studies shows that they do not contain any results on the impact of uncontrolled recirculation on the efficiency of ventilation systems. Technological audit of the pneumatic system of aspiration and enrichment of chrysotile asbestos of the enrichment shop of JSC «Kostanay Minerals» showed low energy efficiency of the ventilation system, a significant volume of uncontrolled air recirculation. A significant influence of the relative position of the fans and the design features of the outlet dampers, their non-tightness on the energy efficiency of the ventilation system was established. The decrease in the aerodynamic parameters of the fans in relation to their passport characteristics amounted to $\eta_{ст}$ = 13%, for efficiency, $P_{ст}$ = 23% for static pressure, N = 8% for power. The article proposes a methodology for calculating the criteria for assessing the energy efficiency of a fan complex and ways to improve it based on the equations of material and energy balances taking into account the information matrix, leaks, and the construction of nomograms for consumption and losses of the energy carrier. It is calculated that it is theoretically possible to achieve the efficiency of the fan complex up to the values: $\eta_{ВК}$ = 0,71. Following the implementation of technical measures to modernize the fan complex of the pneumatic aspiration system and enrichment of the enrichment shop of Kostanay Minerals JSC, its energy efficiency was increased by 24% to $\eta_{ВК}$ = 0,5, which made it possible to reduce the number of operating fans from 12 to 10, ensuring savings of 2.5 million kW/year of electricity.

Key words: fan complex, aerodynamics, flow, depression, energy efficiency criteria, material balance, energy balance, recirculation.

For citation: Makarov V. N., Nurkhozhaev E. S., Makarov N. V., Akhmetov R. G. Experimental research and methods for increasing the energy efficiency of ventilation systems of pneumatic systems at enterprises of the mining and metallurgical complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):32-47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_32.

Введение

Системы аспирации и пневмотранспорта широко применяются для пневматического обогащения минералов, их перемещения, уборки помещений, удаления отходов, снижения запыленности рабочей зоны и уменьшения выбросов в атмосферу. Их применение особенно развито в горно-обогатительной, металлургической промышленности (ГМК). Различие установок аспирации и пневмотранспорта состоит исключительно в конечных целях их применения: в системах аспирации по воздуховодам перемещается воздух с пылевыми включениями для снижения загрязнения рабочей зоны и уменьшения выбросов в атмосферу, а пневмотранспорт предназ-

начен для транспортировки минерального сырья [1 — 3].

В 70-е годы прошлого столетия при проектировании крупных предприятий ГМК в условиях низких цен на энергоносители за основу брали централизованную систему обеспечения воздухом аспирации производственных помещений, пневмотранспортирования и технологии переработки минерального сырья. В частности, предприятия по добыче и производству хризотил-асбеста имели единый модуль пневмосистемы аспирации и обогащения, включающий вентиляторный комплекс (ВК) с большим количеством, как правило, центробежных вентиляторов высокого давления с суммарным расходом воздуха более 3* *10^6 $м^3$/ч. По мере совершенствования техники и технологии указанное неизбежно привело к нерациональному использованию энергоносителей, снижению конкурентоспособности предприятий [4].

Аэродинамическая характеристика пневмосистемы аспирации и обогащения во многом определяет эффективность ее работы, расход, скорость движения энергоносителя и величину депрессии, необходимой для перемещения воздуха, т.е. фактически ее энергоэффективность.

Проведенный анализ аналогичных работ показал, что в них аэродинамические расчеты пневмосистем аспирации и обогащения выполняются с целью определения сопротивлений для выбора вентиляторов и расчета параметров аспирации, пневматических сопел, при этом отсутствуют результаты влияния на их эффективность неуправляемой рециркуляции [5].

Технологический аудит пневмосистемы аспирации и обогащения хризотил-асбеста в цехе обогащения АО «Костанайские минералы» показал низкую эффективность ВК, значительный объем неуправляемой рециркуляции воздуха через воздуховоды неработающих вентиляторов, представляющих собой фактически байпасы. При этом используемые в них выходные заслонки не обеспечивают требуемой герметичности и одновременно существенно снижают энергоэффективность вентиляторов, т.е. их коэффициент полезного действия в составе ВК.

Оценка энергоэффективности ВК пневмосистемы аспирации и обогащения, разработка методики проведения промышленных исследований и структурирования издержек, способов и средств их снижения является актуальной задачей повышения конкурентоспособности предприятий ГМК.

Предмет, объект, цель и методы

Предметом и объектом исследований является ВК пневмосистем аспирации, обогащения минерального сырья и аэродинамические процессы, происходящие в них в части управления расходом энергоносителя. Цель исследований заключается в разработке метода повышения энергоэффективности ВК на базе использования уравнений материального, энергетического баланса, информационной матрицы и номограммы аэродинамических параметров на различных режимах работы пневмосистемы аспирации и обогащения, обоснования необходимости учета неуправляемой рециркуляции воздуха с использованием современных требований к методам промышленных исследований. Построение методики базируется на гипотезе о корреляции энергоэффективности ВК с неуправляемой рециркуляцией воздуха и степенью соответствия аэродинамических характеристик вентиляторов в составе ВК их индивидуальной характеристике.

Результаты исследований

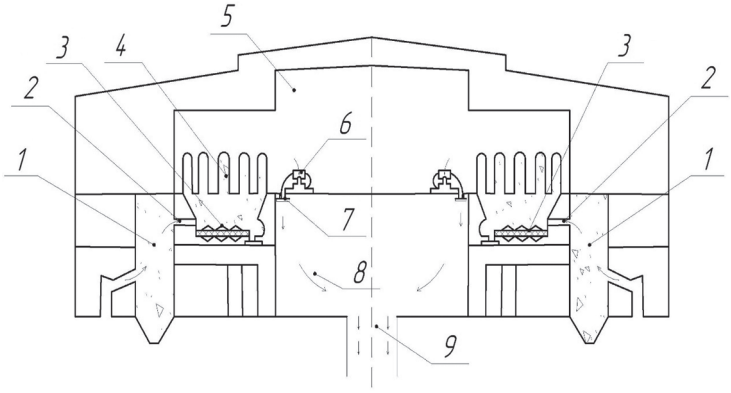
Промышленные аэродинамические исследования, разработка методики струк-

турирования, ранжирования факторов, влияющих на энергетическую эффективность ВК, способов и средств ее повышения проведены на базе цеха обогащения АО «Костанайские минералы», схема структурных элементов которого приведена на рис. 1.

Особенностью данного ВК является наличие в его составе 25 вентиляторов фирмы Keith Blackman типа 95.М, работающих параллельно. Подача воздуха во входной коллектор двух поточных вентиляторов осуществляется из вакуум-камеры, а выдача воздуха через воздуховоды с выходными заслонками — в коллектор чистого воздуха (КЧВ).

В процессе исследования было установлено, что конструктивное исполнение представленного ВК обусловливает значимое отличие аэродинамических характеристик вентиляторов от их фактических значений при параллельной работе вентиляторов, что создает определенные сложности при проведении исследований и расчетов. На аэродинамические характеристики параллельно работающих вентиляторов существенное влияние оказывает взаимное расположение вентиляторов, в частности, положение входных коллекторов по отношению друг к другу, расстояние между ними, конструкция, принцип работы выходных заслонок. Указанное приводит к возникновению внутренних перетечек энергоносителя, т.е. неуправляемой рециркуляции воздуха непосредственно в ВК. В этом случае количество воздуха, поступающего в коллектор запыленного воздуха (КЗВ), а также выдаваемого в шахты раздачи рециркуляционного воздуха (ШРВ), могут существенно отличаться от суммарного расхода воздуха, подаваемого вентиляторами из вакуум-камеры в КЧВ. Определение доли неуправляемой рециркуляции, снижения параметров вентиляторов является важной задачей повышения энергоэффективности ВК.

В процессе работы вентиляторов на входе в ВК, т.е. в КЗВ создается разрежение, за счет которого обеспечивается пневмотранспортирование хризотил-ас-



1 – коллектор запыленного воздуха; 2 – воздуховоды между коллектором чистого воздуха и корпусом рукавного фильтра с заслонкой; 3 – корпус рукавных фильтров; 4 – рукавные фильтры; 5 – вакуум-камера; 6 – вентиляторы фирмы Keith Blackman типа 95.М; 7 – воздуховоды от вентиляторов в коллектор чистого воздуха с выпускными заслонками; 8 – коллектор чистого воздуха; 9 – шахты раздачи рециркуляционного воздуха

Рис. 1. Схема структурных элементов вентиляторного комплекса пневмосистемы аспирации и обогащения хризотил-асбеста цеха обогащения АО «Костанайские минералы»

Fig. 1. Schematic diagram of the structural elements of the fan complex of the pneumatic system for aspiration and enrichment of chrysotile asbestos in the enrichment shop of Kostanay Minerals JSC

беста в процессе обогащения и его сепарация в циклонах. Энергоноситель, т.е. воздух, от которого в воздушных сепараторах отделяются волокна хризотил-асбеста, поступает за счет депрессии из КЗВ по воздуховодам в корпус рукавного фильтра, проходя тонкую очистку в них, и подается в ваккум-камеру. Осевшие волокна хризотил-асбеста из корпуса рукавного фильтра через шлюзовой питатель поступают на конвейер дополнительной переработки. Очищенный воздух вентиляторами нагнетается через воздуховоды и открытые выходные заслонки в КЧВ, откуда за счет избыточного давления подается в ШРВ по этажам цеха обогащения.

Таким образом осуществляется непрерывная рециркуляция энергоносителя, что позволяет обеспечить требуемые экологические показатели технологии обогащения хризотил-асбеста.

Наличие КЧВ, который аэродинамически связан с вакуум-камерой через воздуховоды резервных неработающих вентиляторов суммарной площадью их закрытых выходных заслонок, превышающей 50 м^2, приводит к существенной неуправляемой рециркуляции части воздуха из КЧВ в вакуум-камеру.

Кроме неуправляемой рециркуляции воздуха внутри ВК в силу негерметичности конструкции структурных элементов имеют место существенные притечки воздуха, в частности в области соединения заслонок из КЗВ с электроприводом, в корпусе рукавного фильтра, в месте соединения шлюзового питателя с конвейером, а также в строительных конструкциях здания ВК. Необходимо отличать неуправляемую рециркуляцию воздуха внутри ВК, которая не изменяет количество воздуха, подаваемого вентиляторами в ШРВ, от притечек воздуха через внешние неплотности, которые, увеличивая количество воздуха, подаваемого в вышеуказанные шахты, не изменяют количество энергоносителя в системе аспирации и пневмообогащения хризотил-асбеста цеха обогащения [6, 7].

Особенность методики ранжирования факторов энергоэффективности ВК заключается в совокупности предложенных критериев ее оценки и их взаимосвязи с аэродинамическими характеристиками вентиляторов, геометрическими параметрами структурных элементов при показателях энергоносителя, обеспечивающих требуемые параметры процесса аспирации и обогащения [8—10].

Методика расчета критериев оценки энергоэффективности ВК построена на основе учета влияния на них расхода энергоносителя, т.е. воздуха, потерь его внутренней энергии, т.е. статического и динамического давления в процессе его перемещения, затрат на преобразование электрической энергии в механическую и далее во внутреннюю энергию воздуха во взаимосвязи со структурой и геометрическими параметрами его элементов.

Методика замеров аэродинамических параметров базируется на ГОСТ 10921-2017 и ГОСТ ISO 5802-2012. В процессе испытаний использовались следующие приборы: измеритель комбинированный ТАММ-20М, преобразователь давления Polar Bear DPM-2500D, термоанемометр DT-8880, анемометр CEM DT-619.

С учетом аэродинамических процессов, протекающих в ВК, в качестве базовых критериев его энергоэффективности принят КПД, включающий три структурных составляющих:

$$\eta_{ВК} = \eta_Q * \eta_р * \eta_в, \qquad (1)$$

где $\eta_Q = 1 - \dfrac{\sum_{i=1}^{n} Q_{pi} + \sum_{k=1}^{l} Q_{nk}}{\sum_{j=1}^{m} Q_{вi}} -$

объемный КПД ВК, характеризующий эффективность по расходу воздуха; Q_{pi} — рециркуляция воздуха через воздуховод *i*-го неработающего вентилятора; $Q_{пк}$ — притечки воздуха через *k*-й структурный элемент ВК; $Q_{вj}$ — производительность *j*-го работающего вентилятора; $\eta_р = (P_{кзв} / P_{шрв})$ — аэродинамический КПД ВК, характеризующий эффективность расхода внутренней энергии воздуха, т.е. статического и динамического давления; $\eta_в(Q_в)$ — аэродинамический КПД вентилятора, т.е. эффективность преобразования энергии электродвигателя во внутреннюю энергию воздуха.

Для оценки энергоэффективности ВК без учета аэродинамической связи его с внешней средой принят внутренний КПД, учитывающий только рециркуляцию воздуха, в виде

$$\eta_{вкв} = \eta_{Qв} * \eta_р * \eta_В, \qquad (2)$$

где $\eta_{Qв} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{pi}}{\sum_{j=1}^{m} Q_{вi}}$ —

внутренний объемный КПД ВК, определяющий эффективность расхода энергоносителя без учета притечек наружного атмосферного воздуха в структурные элементы.

Приведенные критерии оценки энергетической эффективности ВК функционально связаны с геометрическими параметрами структурных единиц, определяемыми их технологическим назначением, характеристиками вентиляторов, особенностями компоновки в составе комплекса. Для установления функциональной связи, расчета фактических значений КПД и соответственно возможности ранжирования негативного влияния на энергоэффективность ВК и как результат разработки научно обоснованных технических мероприятий по модернизации в статье предложена методика формирования его информационной матрицы [10, 11].

Формирование информационной матрицы ВК, множественной корреляции ее параметров осуществлялось в работе на базе аэродинамических характе-

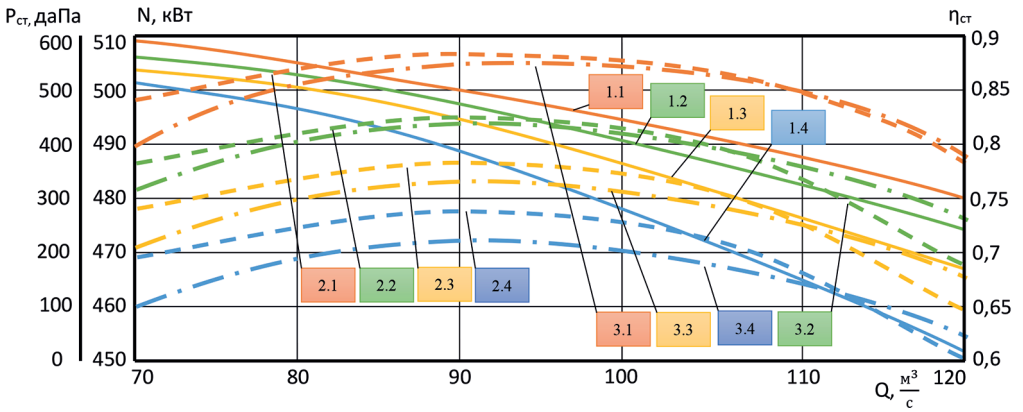


Рис. 2. Графики среднестатистических аэродинамических характеристик вентиляторов фирмы Keith Blackman типа 95.M в области рабочих режимов: (1.1–1.4) – статическое давление, $P_{ст}$; (2.1–2.4) – статический КПД $\eta_{ст}$; (3.1–3.4) – мощность N; (1.1–3.1) – паспортная; (1.2–3.2) – фактическая индивидуальная; (1.3–3.3) – с учетом влияния выпускных заслонок; (1.4–3.4) – в составе вентиляторного комплекса

Fig. 2. Graphs of average statistical aerodynamic characteristics of Keith Blackman fans type 95.M in the range of operating modes: (1.1–1.4) – static pressure, P_{st}; (2.1–2.4) – static efficiency η_{st}; (3.1–3.4) – power N; (1.1–3.1) – rated; (1.2–3.2) – actual individual; (1.3–3.3) – taking into account the influence of the outlet dampers; (1.4–3.4) – as part of a fan complex

ристик энергоносителя, замеренных в контрольных точках в промежутке времени стабильной, устойчивой работы вентиляторов (см. рис. 1). Замеры в каждой точке проводили как минимум при трех значениях режимных параметров вентиляторов в целях обеспечения достоверности получаемых результатов и возможности расчета коэффициентов взаимной корреляции [12, 13].

Особенностью данной методики проведения замеров является постоянный контроль при каждой совокупности замеров материального баланса энергоносителя в ВК, что обеспечивает интегральную точность и, как результат, — объективность построения информационной матрицы ВК [14].

С учетом вышесказанного на первом этапе построения информационной матрицы были уточнены фактические характеристики вентиляторов, их корреляция с геометрическими параметрами ВК и взаимным расположением в вакуум-камере, приведенные на рис. 2.

Фактическое снижение среднестатистического КПД вентиляторов фирмы Keith Blackman типа 95.М, установленных в вакуум-камере пневмосистемы аспирации и обогащения хризотил-асбеста цеха обогащения АО «Костанайские минералы», на номинальном режиме по отношению к паспортной характеристике составляет 0,05, т.е. 6%; фактическое снижение потребляемой вентиляторами мощности составляет 15 кВт, т.е. 3%; статическое давление, развиваемое вентиляторами, составляет 40 даПа, т.е. 8%. Указанные предельные отклонения аэродинамических характеристик вполне приемлемы для дальнейшей эксплуатации вентиляторов с учетом допускаемой при исследованиях в промышленных условиях погрешности (см. рис. 2).

Анализ приведенных на рис. 2 среднестатистических аэродинамических характеристик вентиляторов фирмы Keith Blackman типа 95.М позволяет сделать выводы о существенном влиянии на них взаимного расположения вентиляторов и конструктивных особенностей выходных заслонок. Снижение аэродинамических параметров вентиляторов в составе ВК по отношению к их паспортной характеристике составило по КПД $\eta_{ст}$ = 13%, по статическому давлению $P_{ст}$ = 23%, по мощности N = 8%.

Среднестатистическое снижение статического давления, обусловленное влиянием работающих смежных вентиляторов, составляет не менее 45 даПа, т.е. 9%, и приводит к снижению статического КПД на 5%, при снижении потребляемой мощности на номинальном режиме на 20 кВт, т.е. 4%.

Кроме того, влияние выпускных заслонок, как показано выше, также весьма существенно и составляет на номинальном режиме около 3% по КПД, 6% по статическому давлению, а также приводит к росту на 3% потребляемой мощности (см. рис. 2).

Таким образом, нерациональное расположение вентиляторов в ВК по оси входных коллекторов привело к снижению энергоэффективности не менее чем на 5%.

Статистическая достоверность результатов аэродинамических испытаний вентиляторов, в том числе и в составе ВК, была определена с использованием t-критерия Стьюдента.

При числе степеней свободы, т.е. количестве проведенных экспериментов по каждому фактору, равном 25, с доверительной вероятностью 0,95 критическое значение критерия Стьюдента $t_{кр}$ = 2,0595, при этом его фактическое значение $St_f \leqslant 1{,}995$. Указанное подтверждает статистическую значимость среднестатистических аэродинамических характеристик вентиляторов фирмы Keith Blackman типа 95.М, приведенных на рис. 2 [15].

В целях повышения эффективности ВК целесообразно расположение их по диагонали, исключая взаимное негативное влияние входных коллекторов, особенно при использовании двух поточных центробежных вентиляторов, а также герметичных заслонок, конструктивно располагаемых вне потока воздуха в открытом положении.

На втором этапе с учетом фактических аэродинамических характеристик вентиляторов было построено уравнение материального баланса ВК [16]:

$$\sum_{i=1}^{k} Q_{Bi} = \left(Q_{кзв1} + Q_{кзв2}\right) + \left(Q^{n}_{кзв1} + Q^{n}_{кзв2}\right) + \\ + \sum_{i=1}^{92} Q^{n}_{ши} + \sum_{i=1}^{92} Q^{n}_{ki} + Q^{n}_{вк} + \sum_{i=1}^{n} Q^{p}_{Bi} = \\ = Q_{кчв} = \sum_{i=1}^{10} Q_{шрВi} - \sum_{i=1}^{k} Q^{p}_{Bi} \qquad (3)$$

где $Q_{вi}$ — расход воздуха через *i*-й вентилятор; $Q_{кзв1}$, $Q_{кзв2}$ — расход воздуха через КЗВ из пневмосистемы аспирации и пневмотранспорта цеха обогащения; $Q_{шiп}$ — притечки воздуха через шибер *i*-го воздуховода из КЗВ в корпус рукавного фильтра; $Q_{kiп}$ — притечки воздуха через *i*-й корпус рукавного фильтра; $Q_{вкп}$ — притичеки воздуха в вакуум камеру; $Q_{вір}$ — объем неуправляемой рециркуляции через *i*-й неработающий вентилятор; $Q_{кчв}$ — объем воздуха, поступающего в КЧВ.

С учетом технологической схемы ВК, включающей 92 воздуховода, соединяющих КЗВ с вакуум-камерой через систему тонкой пылеочистки, расход воздуха через два КЗВ, определяемый путем замера поля скоростей в воздуховодах, составил: $Q_{кзв1}$ = (395±15) м³/с, $Q_{кзв2}$ = = (405±15) м³/с.

Расчет неуправляемой рециркуляции, т.е. воздуха через воздуховоды и технологические зазоры выходных заслонок неработающих вентиляторов из КЧВ в вакуум-камеру, производился путем построения поля скоростей во входных коллекторах вентиляторов. С точки зрения аэродинамики, в процессе работы ВК пневмосистемы аспирации и обогащения неработающие вентиляторы с их воздуховодами представляют собой байпасы, т.е. обходные обратные каналы из КЧВ в вакуум-камеру, чем существенно влияют на его энергоэффективность [17, 18].

Экспериментально установлено, что работающие смежные вентиляторы снижают производительность вентилятора, создавая дополнительную депрессию в их входных коллекторах. В противовес этому смежный работающий вентилятор увеличивает неуправляемую рециркуляцию воздуха через входной коллектор неработающего вентилятора на 9—12% по отношению к коллектору со стороны неработающего смежного вентилятора за счет дополнительной депрессии, обусловленной преобразованием статического давления в вакуумкамере в динамическое давление на входе в коллектор вентилятора. Значимость влияния смежного вентилятора на величину неуправляемой рециркуляции обусловлено главным образом тем, что скорость потока на входе в коллектор смежного работающего вентилятора превышает 35 м/с на номинальном режиме, создавая эжекционную струю на расстоянии до 13 м по оси вентилятора.

Анализ поля скоростей неуправляемой рециркуляции на выходе из коллекторов неработающих вентиляторов позволил рассчитать ее фактическое среднее значение. Средний расход неуправляемой рециркуляции через входной коллектор вентилятора с работающим смежным вентилятором равняется 8,1 м³/с, а с неработающим 7,3 м³/с, что соответствует объему неуправляемой рециркуляции воздуха между вакуумкамерой и КЧВ $Q_{р}^{13}$ = 200 м³/с.

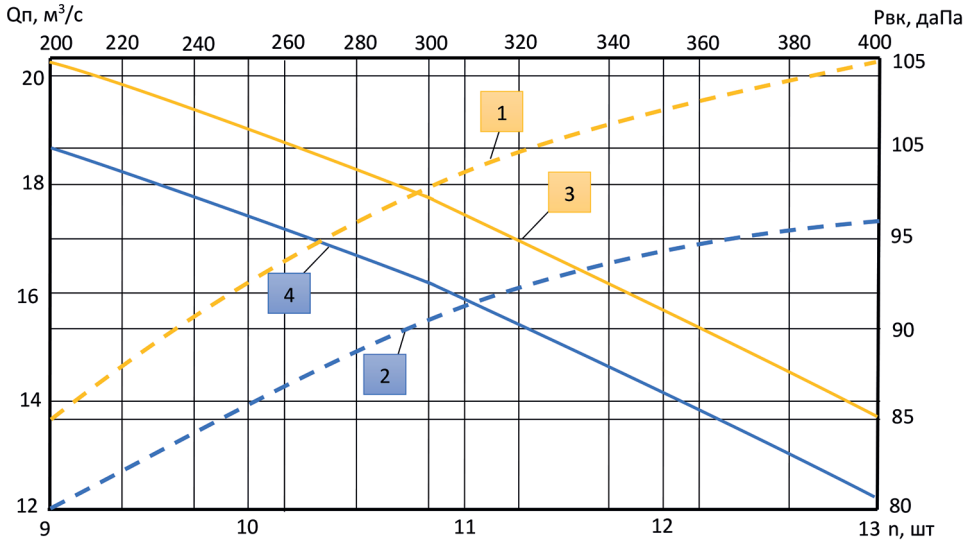


Рис. 3. Динамика неуправляемой рециркуляции воздуха в вакуум-камеру из коллектора чистого воздуха в расчете на один неработающий вентилятор — байпас в зависимости от депрессии в вакуум-камере при работе 12 вентиляторов. Производительность одного вентилятора в зависимости от количества параллельно работающих вентиляторов: 2, 3 – смежные вентиляторы не работают; 1, 4 – смежные вентиляторы работают

Fig. 3. Dynamics of uncontrolled air recirculation into the vacuum chamber from the clean air collector per one non-operating fan — bypass depending on the depression in the vacuum chamber when 12 fans are operating. Performance of one fan depending on the number of fans operating in parallel: 2, 3 – Adjacent fans will operate; 1, 4 – Adjacent fans are operating

На рис. 3 приведена динамика неуправляемой рециркуляции воздуха между КЧВ и вакуум-камерой в расчете на один неработающий вентилятор в зависимости от депрессии в вакуум-камере при работе 12 вентиляторов.

Анализ поля скоростей неуправляемой рециркуляции на выходе из коллекторов неработающих вентиляторов позволил рассчитать ее фактическое среднее значение.

Средний расход неуправляемой рециркуляции через входной коллектор вентилятора с работающим смежным вентилятором равняется 8,1 м³/с, а с неработающим 7,3 м³/с, что соответствует

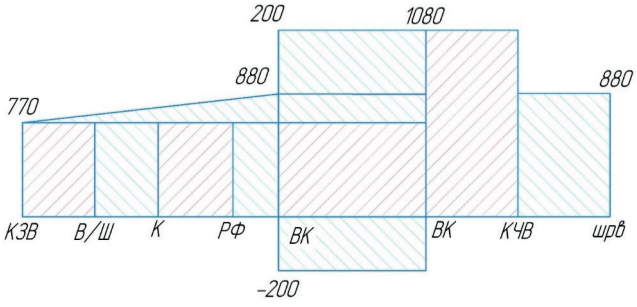


Рис. 4. Номограмма расхода энергоносителя в структурных элементах ВК с учетом неуправляемой рециркуляции и суммарных внешних притечек

Fig. 4. Nomogram of energy consumption in the structural elements of the air handling unit taking into account uncontrolled recirculation and total external leaks

объему неуправляемой рециркуляции воздуха $Q_р^{13}$ = 200 м³/с.

При переходе с 12 работающих вентиляторов на 11 расход энергоносителя через КЗВ снижается на 20% из-за депрессии в ВК. При этом объем неуправляемой рециркуляции из КЧВ в вакуум-камеру через один вентилятор снижается на 6%, так как перепад давления между вакуум-камерой и КЧВ снижается с 340 даПа на 24 даПа, т.е. на 7%.

С учетом вышесказанного уравнение материального баланса позволяет установить объем внешних притечек и построить номограмму расхода энергоносителя в ВК, приведенную на рис. 4.

Для построения уравнения энергетического баланса в целях расчета критериев оценки энергоэффективности ВК были определены аэродинамические коэффициенты его структурных элементов, приведенные в табл. 1 и рассчитанные по формуле

$$\alpha_i = \frac{\Delta P_i}{\rho Q_i^2}, \qquad (4)$$

где Q_i — расход энергоносителя в i-м измерительном сечении; ΔP_i — перепад давления в структурном элементе ВК, определяемые в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 5804-2012. Уравнение энергетического баланса движения воздуха в ВК с учетом аэродинамических коэффициентов воздуховодов и структурных элементов в соответствии с его технологической схемой представим в следующем виде [19—21]:

$$P = P_{ст} + P_d = P_{ВК} + \left(1 + \alpha_з\right)Q^2 + \\ + \left(1 + \alpha_р\right)^2 = P_{КЗВi} + \left(1 + \alpha_ш\right)\cdot Q_{КЗВi}^2 + \\ + \alpha_k \left(Q_{КЗВi} + \sum_{j=1}^{48} Q_{ki}^n \right)^2 + \\ + \alpha_{рф} \left(Q_{КЗВi} + \sum_{j=1}^{48} Q_{ki}^n \right)^2 + Pd \qquad (5)$$

где $P_{ст}$, P_d — статическое, динамическое давление вентилятора; $P_{ВК}$ — депрессия в вакуум-камере; $P_{КЗВi}$ — депрессия в коллекторе запыленного воздуха; i — 1,2; $\alpha_з$, $\alpha_р$, $\alpha_ш$, $\alpha_к$, $\alpha_{рф}$ — аэродинамические коэффициенты выходной заслонки воздуховода вентилятора, входной решетки шахты раздачи рециркуляционного воздуха, шибера на выходе из коллектора запыленного воздуха, корпуса рукавного фильтра, рукавного фильтра.

Таблица 1

Информационная матрица аэродинамических параметров ВК
Information matrix of aerodynamic parameters of the VK

№	Аэродинамический коэффициент	Численное значение
1	Коллектора запыленного воздуха, $\alpha_{кзв}$	$1{,}29 \cdot 10^{-5}$
2	Шахты на выходе из коллектора запыленного воздуха (открыто), $\alpha_ш^з$	$3{,}5 \cdot 10^{-6}$
3	Шахты на выходе из коллектора запыленного воздуха (закрыто), $\alpha_ш^0$	$8{,}6 \cdot 10^{-4}$
4	Корпуса рукавного фильтра, $\alpha_к$	$5{,}56 \cdot 10^{-5}$
5	Рукавного фильтра, $\alpha_{рф}$	$5{,}02 \cdot 10^{-4}$
6	Вентиляторного комплекса, α_Σ	$5{,}74 \cdot 10^{-4}$
7	Выходной заслонки воздуховода вентилятора (открыта), $\alpha_з^о$	$2{,}09 \cdot 10^{-4}$
8	Выходной заслонки воздуховода вентилятора (закрыта), $\alpha_з^з$	11,88
9	Входной решетки шахты раздачи рециркуляционного воздуха, $\alpha_р$	$1{,}88 \cdot 10^{-4}$

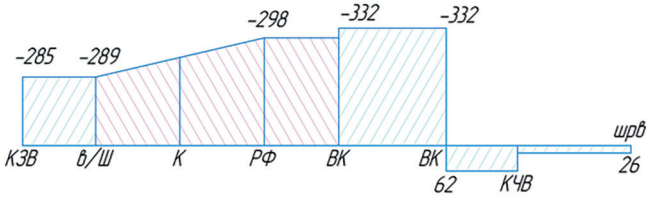


Рис. 5. Номограмма депрессии энергоносителя в структурных элементах ВК
Fig. 5. Nomogram of energy carrier depression in the structural elements of the VK

В соответствии с информационной матрицей и уравнением энергетического баланса построена номограмма потерь энергии воздушного потока в ВК, приведенная на рис. 5.

С учетом предложенной методики, номограмм расхода и депрессии энергоносителя, формул (1), (2) произведен расчет критериев оценки энергоэффективности ВК, приведенных в табл. 2 [22, 23].

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Аэродинамические коэффициенты структурных элементов ВК изменяются в широком диапазоне от величины $3,5*10^{-6}$ до 11,88, что неизбежно оказывает существенное влияние на характеристики его энергоэффективности.

Аэродинамический коэффициент рукавного фильтра практически соответствует его паспортным значениям $\alpha_{рф}$ = $= 5,2*10^{-4}$, что позволяет сделать вывод о несущественном влиянии как корпуса, так и самого рукавного фильтра на энергетическую эффективность ВК. Наибольшее негативное влияние на энергетическую эффективность ВК оказывает выходная заслонка воздуховода вентилятора, аэродинамический коэффициент которой равен $\alpha_з^0 = 2,09*10^{-4}$ в ее открытом положении и $\alpha_з^з = 11,88$ в закрытом положении. Несмотря на герметичность выходной заслонки в силу существенного перепада давления между КЧВ и вакуум-камерой имеет место значительная неуправляемая рециркуляция воздуха, составляющая более 15 м³/с в расчете на 1 неработающий вентилятор.

Таким образом, с учетом экспериментальных, промышленных исследований и расчетов, приведенных выше, получены следующие значения структурных составляющих КПД.

Аэродинамический КПД вентилятора $\eta_в = 0,81$, аэродинамический КПД ВК $\eta_р = 0,78$, объемный КПД ВК $\eta_Q = 0,84$, объемный внутренний КПД ВК

Таблица 2

Критерии оценки энергоэффективности вентиляторного комплекса
Energy efficiency assessment criteria for a fan system

Критерий энергоэффективности	До модернизации	После модернизации	Теоретически достижимая
КПД ВК, $\eta_{ВК}$	0,4 ± 0,015	0,51 ± 0,015	0,71
Внутренний КПД ВК, $\eta_{вкв}$	0,44 ± 0,015	0,58 ± 0,015	0,73
Объемный КПД ВК, η_Q	0,71 ± 0,02	0,84 ± 0,02	0,98
Объемный внутренний КПД ВК, $\eta_{Qв}$	0,73 ± 0,02	0,86 ± 0,02	0,98
Аэродинамический КПД ВК, $\eta_р$	0,74 ± 0,02	0,78 ± 0,02	0,89
Аэродинамический КПД вентилятора, $\eta_в$	0,78 ± 0,02	0,81 ± 0,02	0,87

$\eta_{Qв}$ = 0,86, КПД ВК $\eta_{ВК}$ = 0,51, а внутренний КПД $\eta_{ВКВ}$ = 0,58

Фактически при существующей технологической схеме может быть достигнуто значение КПД ВК до величины $\eta_{ВК}$ = 0,51, а внутреннего КПД $\eta_{ВКВ}$ = = 0,58, т.е. возможно повышение энергоэффективности ВК не менее чем на 28%, в том числе за счет повышения энергоэффективности вентиляторов на 4%, снижения потерь статического давления на 3%, устранения неуправляемой рециркуляции на 21%.

Обсуждение результатов

Из анализов приведенных расчетов, структурных составляющих критерия оценки энергоэффективности ВК можно сделать вывод о целесообразности их учета при разработке технически обоснованных оптимальных предложений его модернизации.

В табл. 2 приведены теоретически максимально достижимые значения энергоэффективности ВК. С учетом изменения технологической схемы возможно достижение КПД ВК до $\eta^{т}_{ВК}$ = 0,71, то есть увеличение на 78% по сравнению с его фактическим значением. Однако реализация мероприятий по достижению данного значения КПД ВК требует принципиального изменения технологической схемы вентиляции на схему с индивидуальной аэродинамической связью вентиляторов с локальными участками пневмосистемы аспирации и обогащения, что позволит полностью исключить потери энергоносителя, как в КЧВ, так и вакуум-камере.

С учетом вышесказанного можно научно обоснованно определить основные направления модернизации ВК по критерию энергоэффективности.

Наиболее целесообразно для повышения энергоэффективности ВК — повышение его объемного внутреннего КПД за счет устранения неуправляемой рециркуляции через воздуховоды-байпасы. С позиции назначения выходных заслонок вентиляторов, проведенных промышленных исследований анализа результатов можно сделать однозначный вывод, что используемая конструкция выходных заслонок двух исполнений технически необоснованна, поскольку, с одной стороны, находится в воздушном потоке, непрерывно расходуя статическое давление, а с другой стороны, использует часть статического давления на поддержание двухлопастной заслонки в процессе работы вентилятора. При этом в режиме неработающего вентилятора данная конструкция в принципе не позволяет обеспечить технически требуемую герметичность, поскольку фактически предназначена в качестве регулятора воздушного потока. Увеличение объемного внутреннего КПД ВК составит не менее 22% с η_{Q} = 0,71 до η_{Q} = 0,86. Следует заметить, что теоретически достижимый объемный КПД η_{Q} = 0,98.

Дополнительно энергоэффективность ВК можно повысить за счет снижения потерь давления в КЧВ, на выходе в шахты подачи рециркуляционного воздуха. Увеличение аэродинамического КПД ВК составит не более 3%, с $\eta_{р}$ = = 0,75 до $\eta_{р}$ = 0,78.

За счет повышения энергоэффективности вентиляторов снижение энергозатрат ВК составит не более 3%, повышение КПД вентилятора с $\eta_{ст}$ = 0,78 до $\eta_{ст}$ = 0,81.

Изменение схемы расположения ВК дополнительно позволит повысить энергоэффективность на 5%.

Таким образом, за счет внедрения технических мероприятий внутренний КПД ВК может быть увеличен на 28%, т.е. до $\eta_{ВКВ}$ = 0,58, а КПД ВК до $\eta_{ВК}$ = = 0,51.

По итогам промышленных исследований и модернизации ВК пневмо-

системы аспирации и обогащения цеха обогащения АО «Костанайские минералы» его энергоэффективность была увеличена на 24%, до $\eta_{ВК}$ = 0,5, что позволило сократить количество работающих вентиляторов с 12 до 10, обеспечив экономию электроэнергии 2,5 млн кВт/ /год, при этом срок окупаемости затрат составил 1,9 года.

Заключение

Проведены промышленные экспериментальные исследования, показавшие снижение аэродинамических параметров вентиляторов фирмы Keith Blackman типа 95.М в составе ВК пневмосистемы аспирации и обогащения цеха обогащения АО «Костанайские минералы» по отношению к паспортным характеристикам: по статическому КПД $\eta_{ст}$ на 8%, с 0,87 до 0,84, по статическому давлению $P_{ст}$ на 22%, с 530 до 410 даПа, по потребляемой мощности N на 14%, с 501 до 420 кВт. Указанные предельные отклонения аэродинамических характеристик вполне приемлемы для дальнейшей эксплуатации вентиляторов с учетом допускаемой при исследованиях в промышленных условиях погрешности.

Получены критерии оценки энергетической эффективности ВК. Аэродинамический коэффициент полезного действия ВК $\eta_{р}$ = 0,74, объемный КПД ВК η_{Q} = 0,71, объемный внутренний КПД ВК η_{Q} = 0,79, фактический КПД $\eta_{ВК}$ = = 0,4, фактический внутренний КПД $\eta_{ВК}$В = 0,44.

Установлено, что теоретически возможно достижение КПД ВК $\eta^{т}_{ВК}$ = = 0,71.

По итогам внедрения технических мероприятий по модернизации ВК пневмосистемы аспирации и обогащения хризотил-асбеста цеха обогащения АО «Костанайские минералы» его энергоэффективность была увеличена на 24%, до $\eta_{ВК}$ = 0,5, что позволило сократить количество работающих вентиляторов с 12 до 10, обеспечив экономию электроэнергии 2,5 млн кВт/год.

Авторы выражают признательность руководству АО «Костанайские минералы» (Республика Казахстан) за помощь в организации и проведении промышленных испытаний вентиляторного комплекса пневмосистемы аспирации и обогащения хризотил-асбеста цеха обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А. Н.* Методологические положения формирования и оценки экономического ущерба // Известия УГГУ. — 2019. — № 3(55). — С. 157—161. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-157-161.

2. *Аверкова О. И.*, *Логачев И. Н.*, *Логачев К. И.* Аэродинамика противопылевой вентиляции. — М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. — 432 с.

3. *Посохин В. Н.* Аэродинамика вентиляции. — М.: АВОК-ПРЕСС, 2017. — 936 с.

4. *Антипов А. В.*, *Дубровин И. А.* Монтаж, пуск и наладка систем вентиляции. — М.: Academia, 2016. — 64 с.

5. *Киреев В. М.*, *Минко В. А.*, *Гольцов А. Б.*, *Болгов А. И.* Рециркуляционные энергоэффективные системы аспирации с использованием эффекта Коанда // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2019. — № 12. — С. 57—62. DOI: 10.12737/article_5c1c995c7f4e35.90271716.

6. *Scalise K. A.*, *Teixeira M. B.*, *Kocsis K.* Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 38, pp. 575—579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.

7. *Kychkin A., Nikolaev A.* Architecture du système de contrôle de la ventilation des mines basée sur l'IoT avec jumeau numérique Dans / Conférence internationale 2020 sur l'ingénierie industrielle. Applications et fabrication: matériaux de l'ICIEAM. New York, 2020, art. 9111995.

8. *Макаров В. Н.*, *Боярских Г. А.*, *Макаров Н. В.*, *Дылдин Г. П.*, *Угольников А. В.* Критерии подобия природной соразмерности турбомашин // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 81—89.

9. *Максимов Г. А.* Движение воздуха при работе систем вентиляции и отопления. — М.: Медиа, 2021. — 528 с.

10. *Иванов А. Н.* Методологические положения формирования и оценки экономического ущерба // Известия УГГУ. — 2019. — № 3(55). — С. 157—161. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-157-161.

11. *Макаров В. Н.*, *Бельских А. М.*, *Макаров Н. В.*, *Чураков Е. О.*, *Дылдин Г. П.* Совершенствование вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения на базе природоподобной соразмерности // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2023. — № 4. — С. 55—67. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-55-67.

12. *Яншина Э. Р.*, *Брацук А. А.*, *Иванова Л. А.* Пути повышения энергоэффективности систем вентиляции // Молодой ученый. — 2016. — № 10 (114). — С. 333—337.

13. *Клепиков Н. П.*, *Соколов С. Н.* Анализ и планирование эксперимента методом максимального правдоподобия. — М.: Наука, 2017. — 194 с.

14. *Боровков В. С.*, *Майрановский Ф. Г.* Аэрогидродинамика систем вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Стройиздат, 2017. — 120 с.

15. *Юл Дж. Эдни, Кэндел М. Дж.* Теория статистики: пер. с англ. — М.: Наука, 2019. — 780 с.

16. *Хворов Г. А.*, *Юмашев М. В.* Анализ энергосберегающих технологий по материалам охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО «Газпром» // Территория нефтегаз. — 2016. — № 91. — С. 127—132.

17. *Суворов А. А.*, *Иванов Ю. А.* Факторы, определяющие эффективность работы естественной вентиляции в жилых домах // Энерго- и ресурсосбережения. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. — 2023. — С. 226—232.

18. *Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmukh* Parameters affecting efficiency of centrifugal pump — A review // International Journal of Scientific Research in Science. 2021, vol. 8, pp. 49—58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.

19. *Макаров Н. В.*, *Антропов Л. А.*, *Макаров В. Н.*, *Баландин В. Н.* Разработка методологии создания энергоэффективных вентиляторов для аппаратов воздушного охлаждения // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — № 4. — Т. 14. — С. 1081—1089. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1081-1089.

20. *Шабанов В. А.*, *Пашкин В. В.*, *Ивашкин О. Н.* Анализ электролитического устройства воздушного охлаждения газа // Электричество и информационные комплексы и системы. — 2014. — Т. 10. — № 1. — С. 18—24.

21. *Zhou S., Lin P., Zhang W., Zhu Z.* Evolution characteristics of separated vortices and near-wall flow in a centrifugal impeller in an off-designed condition // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no. 22, pp. 1—17. DOI: 10.3390/app 10228209.

22. *Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D.*, *Mathews E. H.* Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // South African Journal of Industrial Engineering. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42—51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

23. *Хамзаев А. А.*, *Мусурманов Э. Ш.*, *Хайдарова М. Э.* Повышение энергоэффективности вентиляторных установок // Молодой ученый. — 2017. — № 7 (141). — С. 95—98. RAS

REFERENCES

1. Ivanov A. N. Methodological provisions for the formation and assessment of economic damage. *News of the Ural State Mining University*. 2019, no. 3(55), pp. 157—161. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-157-161.

2. Averkova O. I., Logachev I. N., Logachev K. I. *Aerodinamika protivopylevoy ventilyatsii* [Aerodynamics of dust ventilation], Moscow, 2019, 432 p.

3. Posokhin V. N. *Aerodinamika ventilyatsii* [Aerodynamics of ventilation], Moscow, 2017, 936 p.

4. Antipov A. V., Dubrovin I. A. *Montazh, pusk i naladka sistem ventilyatsii* [Installation, start-up and adjustment of ventilation systems], Moscow, Academia, 2016, 64 p.

5. Kireev V. M., Minko V. A., Goltsov A. B., Bolgov A. I. Recirculation energy-efficient aspiration systems using the Coanda effect. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019, no. 12, pp. 57—62. [In Russ]. DOI: 10.12737/article_5c1c995c7f4e35.90271716.

6. Scalise K. A., Teixeira M. B., Kocsis K. Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 38, pp. 575—579. [In Russ]. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.

7. Kychkin A., Nikolaev A. Architecture du système de contrôle de la ventilation des mines basée sur l'IoT avec jumeau numérique Dans. *Conférence internationale 2020 sur l'ingénierie industrielle. Applications et fabrication: matériaux de l'ICIEAM*. New York, 2020, art. 9111995.

8. Makarov V. N., Boyarskikh G. A., Makarov N. V., Dyl'din G. P., Ugolnikov A. V. Similarity criteria for the natural proportionality of turbomachines. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 8, pp. 81—89.

9. Maksimov G. A. *Dvizhenie vozdukha pri rabote sistem ventilyatsii i otopleniya* [Air movement during operation of ventilation and heating systems], Moscow, Media, 2021, 528 p.

10. Ivanov A. N. Methodological provisions for the formation and assessment of economic damage. *News of the Ural State Mining University*. 2019, no. 3(55), pp. 157—161. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-157-161.

11. Makarov V. N., Belskikh A. M., Makarov N. V., Churakov E. O., Dyldin G. P. Improving fans for air cooling apparatus based on nature-like proportionality. *Minerals and Mining Engineering*. 2023, no. 4, pp. 55—67. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-55-67.

12. Yanshina E. R., Bratsuk A. A., Ivanova L. A. Ways to improve the energy efficiency of ventilation systems. *Young scientist*. 2016, no. 10 (114), pp. 333—337. [In Russ].

13. Klepikov N. P., Sokolov S. N. *Analiz i planirovanie eksperimenta metodom maksimal'nogo pravdopodobiya* [Analysis and planning of an experiment by the maximum likelihood method], Moscow, Nauka, 2017, 194 p.

14. Borovkov V. S., Mayranovskiy F. G. *Aerogidrodinamika sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha* [Aerohydrodynamics of ventilation and air conditioning systems], Moscow, Stroyizdat, 2017, 120 p.

15. Yule J. Edney, Kandel M. J. *Teoriya statistiki*: per. s angl. [Theory of statistics. English–Russian translation], Moscow, Nauka, 2019, 780 p.

16. Khvorov G. A., Yumashev M. V. Analysis of energy-saving technologies for gas cooling materials based on air cooling devices in gas transportation of PJSC Gazprom. *Territory of Oil and Gas*. 2016, no. 91, pp. 127—132. [In Russ].

17. Suvorov A. A., Ivanov Yu. A., Factors determining the efficiency of natural ventilation in residential buildings. *Energo- i resursosberezheniya. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii. Atomnaya energetika*. 2023, pp. 226—232. [In Russ].

18. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmukh Parameters affecting efficiency of centrifugal pump — A review. *International Journal of Scientific Research in Science*. 2021, vol. 8, pp. 49—58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.

19. Makarov N. V., Antropov L. A., Makarov V. N., Balandin V. N. Development of a methodology for creating energy-efficient fans for air cooling devices. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, no. 4, vol. 14, pp. 1081—1089. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1081-1089.

20. Shabanov V. A., Pashkin V. V., Ivashkin O. N. Analysis of an electrolytic device for air cooling of a basin. *Elektrichestvo i informatsionnye kompleksy i sistemy*. 2014, vol. 10, no. 1, pp. 18—24. [In Russ].

21. Zhou S., Lin P., Zhang W., Zhu Z. Evolution characteristics of separated vortices and near-wall flow in a centrifugal impeller in an off-designed condition. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 22, pp. 1—17. DOI: 10.3390/app 10228209.

22. Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42—51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

23. Khamzaev A. A., Musurmanov E. Sh., Khaidarova M. E. Improving the energy efficiency of fan units. *Young scientist*. 2017, no. 7 (141), pp. 95—98. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаров Владимир Николаевич[1] — д-р техн. наук,
доцент, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,
Нурхожаев Ербол Сапарбаевич[2] — председатель правления,
e-mail: info@km.kz,
Макаров Николай Владимирович[1] — канд. тех. наук,
доцент, e-mail: mnikolay84@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7039-6272,
Ахметов Рустам Гумарович[2] — главный механик,
e-mail: Rus.akhmetov@mail.ru,
[1] Уральский государственный горный университет,
[2] АО «Костанайские минералы», Житикара, Республика Казахстан.
Для контактов: Макаров Н.В., e-mail: mnikolay84@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Makarov[1], Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: uk.intelnedra@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,
E.S. Nurkhozhaev[2], Chairman of Board,
e-mail: info@km.kz,
N.V. Makarov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: mnikolay84@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7039-6272,
R.G. Akhmetov[2], Chief Mechanic,
e-mail: Rus.akhmetov@mail.ru,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia,
[2] JSC «Kostanay Minerals», Zhitikara, Republic of Kazakhstan.
Corresponding author: V.N. Makarov, e-mail: mnikolay84@mail.ru.

Получена редакцией 24.07.2025; получена после рецензии 31.07.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 24.07.2025; received after the review 31.07.2025; accepted for printing 10.11.2025.