

УДК 622.6; 620.193.23

В.В. ЛОБОДА, канд. техн. наук, академик МАНЭБ, зав. лаб.,
О.А. ДЕМЧЕНКО, канд. техн. наук, и.о. директора,
В.А. СТЕШЕНКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,
Е.В. ВЕРЕЩАГИНА, науч. сотрудник; МакНИИ, Макеевка

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Разработана комплексная методика оценки остаточного ресурса роторов радиальных вентиляторов в процессе их длительной эксплуатации, основанная на применении законов сопротивления материалов к элементам роторов и критериях предельных величин износа дисков и лопаток рабочих колес радиальных и осевых вентиляторов. Применение методики обеспечивает безопасность эксплуатации шахтных вентиляторных установок в период времени, превышающий нормативный срок службы.

Ключевые слова: вентиляторные установки, износ, шахтная среда, рабочее колесо, срок службы, коррозия, методика, обшивка лопатки, диагностика, коэффициент.

Эксплуатация шахтных вентиляторных установок в период времени, превышающий нормативный срок службы, является актуальной научно-практической задачей. Решение этой задачи позволяет обеспечить безопасность эксплуатации вентиляторных установок и технологических процессов в угольных шахтах [1]. Известно, что длительность существования любого технического устройства или его детали состоит из трех этапов – период создания устройства (детали), нормативный срок службы и срок службы, следующий после нормативного до списания или утилизации. Именно третий этап является наиболее слабо изученным, несмотря на большое количество выполненных научно-исследовательских работ, направленных на обоснование длительности этого этапа.

Обоснование возможности дальнейшей эксплуатации роторов вентиляторов и других узлов вентиляторных установок является сложной научно-технической задачей, от решения которой зависит в конечном итоге безопасность функционирования угольных шахт.

В литературных источниках в основном отражены теоретические расчеты по классическим законам сопротивления материалов. Анализ из-

вестных работ [2-5] показывает, что ученые и конструкторы проектно-конструкторских организаций и заводов-изготовителей рассчитывали вентиляторы именно с использованием этих законов [6, 7]. При этом специфические шахтные условия эксплуатации практически не учитывались. В некоторых публикациях отражается степень износа проточных частей вентиляторов [8-10].

Наиболее точно учесть влияние шахтных условий эксплуатации на работу вентиляторов позволяет научная работа, проведенная сотрудниками НИИГМ им. М.М. Фёдорова, в которой отражены многолетние исследования влияния шахтной среды на коррозию шахтного стационарного оборудования [8].

В табл. 1 приведены данные о фактических сроках службы различных вентиляторов. Как видно, целый ряд вентиляторов работают со значительным превышением нормативного срока службы и требуют серьезного обоснования возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации.

Таблица 1

Фактический срок службы вентиляторов на шахтах
и срок их нормативной эксплуатации в различных средах

№ п/п	Вентиляторы	Шахты	Нормативный срок службы, лет	Фактический срок службы до замены, лет	Среда эксплуатации
1	ВЦД-31,5 (№1 и №2)	Красноармейская-Западная	14	10	Агрессивная
2	ВЦД-47У (№1 и №2)	Красноармейская-Западная	20	21	Агрессивная
3	ВЦД-32М (№2)	Прогресс	14	45	Неагрессивная
4	ВЦД-40 (№1 и №2)	Октябрьский Рудник	20	45	Неагрессивная
5	ВЦД-47У (№1 и №2)	Комсомолец Донбасса	20	35	Неагрессивная
6	ВЦД-32М (№1)	Южнодонбасская №1	14	34 до аварии	Неагрессивная
7	ВРЦД-4,5	Западно-Донбасская	20	35	Неагрессивная
8	ВЦ-25 (№1 и №2)	Ореховская	14	50	Неагрессивная
9	ВЦД-16 (№1 и №2)	Новгородовская №2	14	49	Неагрессивная
10	ВРЦД-4,5 (№1 и №2)	Трудовская	20	41	Неагрессивная

В 2008 году разработана методика оценки и критерии предельных величин износа дисков и лопаток рабочих колес радиальных и осевых вентиляторов. Эти критерии были обоснованы законами сопротивления материалов, применяющимися при исследовании прочностных характеристик элементов роторов вентиляторов ВЦД-31,5 и ВОД-30. Выполненная научно-исследовательская работа позволила разработать отраслевой стандарт [11].

Следует отметить, что допустимые критерии износа деталей роторов этих вентиляторов в основном отражают общую картину напряжений, которые привязаны к конкретным конструктивным размерам деталей этих роторов.

Целью данных исследований является разработка комплексной методики оценки остаточного ресурса элементов проточной части шахтных вентиляторов главного проветривания.

Как показали исследования, при длительной эксплуатации шахтных вентиляторов, перекачивающих запыленный и увлажненный воздух, поступающий из горных выработок, необходимо определять техническое состояние рабочих колес с учетом механического и коррозионного износа. В связи с изложенным предложено новое решение этой важной задачи, основанное на высоких показателях экономичности радиальных вентиляторов ВЦ16, ВЦ25, ВЦД 31,5, ВЦ32М, ВЦД32М, ВЦРД4,5, ВЦД40, ВЦД47У, имеющих профильные загнутые назад лопатки колес, а также осевых вентиляторов типа ВОД.

Влияние шахтной среды на коррозию стационарного шахтного оборудования, постоянно воздействующую, например, на вентиляторы главного проветривания, определяется скоростью коррозии в пределах 0,1...0,4 мм в год. При использовании колес из стали с износостойкими добавками скорость коррозии может быть принята 0,1 мм в год, а для конструкций колес, выполненных из Ст.3, скорость коррозии по результатам исследований составляет 0,2...0,4 мм в год [8]. Из этого следует, что, например, для вентилятора ВЦД32М (№1) при его эксплуатации в течение 43-х лет на северном вентиляционном стволе шахты «Прогресс» ГП «Торезантрацит» в составе вентиляторной установки коррозионный износ на лопатках колес и дисках составит $0,1 \times 43 = 4,3$ мм при номинальной толщине обшивки лопатки колеса 6 мм. Коэффициент остаточного ресурса K_{op} лопатки составит:

$$K_{op} = \frac{\delta_{уз}}{\delta_{ном}} = \frac{4,3}{6} = 0,283, \quad (1)$$

где $\delta_{уз}$ – величина коррозионного износа на лопатках колес и дисках, мм;

$\delta_{ном}$ – величина номинальной толщины обшивки новой лопатки, мм.

Как видно, полученное значение меньше допустимого коэффициента остаточного ресурса $K_{ордон} = 0,5$.

При использовании этого метода следует учитывать, что при замерах толщины обшивок лопаток с внешних сторон (рабочей части профиля и нерабочей) может быть сделано ошибочное заключение о том, что вентиляторное колесо эксплуатируется с остаточным ресурсом выше допустимого. Это объясняется тем, что замеры толщин обшивок посередине профиля между дисками производятся без учета коррозии внутри пустотелой лопатки. При этом фактическая величина коэффициента остаточного ресурса будет меньшей за счет неучтенного коррозионного слоя внутри лопатки.

По усредненным измеренным значениям толщин обшивок и дисков рабочих колес, например, радиальных вентиляторов, производится оценка по отношению к допустимым значениям согласно результатам расчетов, приведенных в [11]. Как следует из расчетов:

$$K_{\text{минорПД}} = 0,7, \quad K_{\text{минорКД}} = 0,8, \quad K_{\text{минорПК}} = 0,5, \quad (2)$$

где $K_{\text{минорПД}}$ – минимальный коэффициент остаточного ресурса покрывного диска колеса;

$K_{\text{минорКД}}$ – минимальный коэффициент остаточного ресурса коренного диска;

$K_{\text{минорПК}}$ – минимальный коэффициент остаточного ресурса обшивки лопатки рабочего колеса.

Установлено, что на одностороннем радиальном вентиляторе ВЦ32М (№1) шахты «Южнодонецкая №1» 08.02.2011 года произошел обрыв хвостовой части одной лопатки колеса примерно на длине равной 1/3 длины хорды профиля при частоте вращения ротора 600 мин^{-1} . При этом установка ВЦ32М эксплуатировалась 34 года, что подтверждает необходимость корректировки методики оценки остаточного ресурса элементов вентиляторов с учетом коррозионного износа.

В результате этой аварии полностью был разрушен ротор, подшипники, вал, спиральный корпус. При этом коэффициент остаточного ресурса, определенный по измерению толщин обшивок лопаток на рабочей стороне, составлял 0,66. Установлено, что разрушение колеса произошло в результате отрыва лопатки по сварочным швам у переднего и заднего дисков колеса, где фактические толщины «живого» металла составляли 1,5...2,0 мм, а коэффициент остаточного ресурса, определенный по этим

измерениям, составлял 0,29, что меньше минимально допустимого значения.

Предлагаемый метод определения остаточных ресурсов лопаток и дисков рабочих колес вентиляторов основан на теоретических и натурных экспериментальных исследованиях путем совместного использования коррозионного метода расчета и результатов замеров толщин элементов рабочих колес [12]. Это позволяет с большей точностью определить область безопасной эксплуатации шахтных вентиляторов главного проветривания во время их длительного периода эксплуатации. Зависимости коэффициентов остаточного ресурса лопаток рабочих колес радиальных шахтных вентиляторов от времени эксплуатации вентиляторных установок представлены на рис. 1.

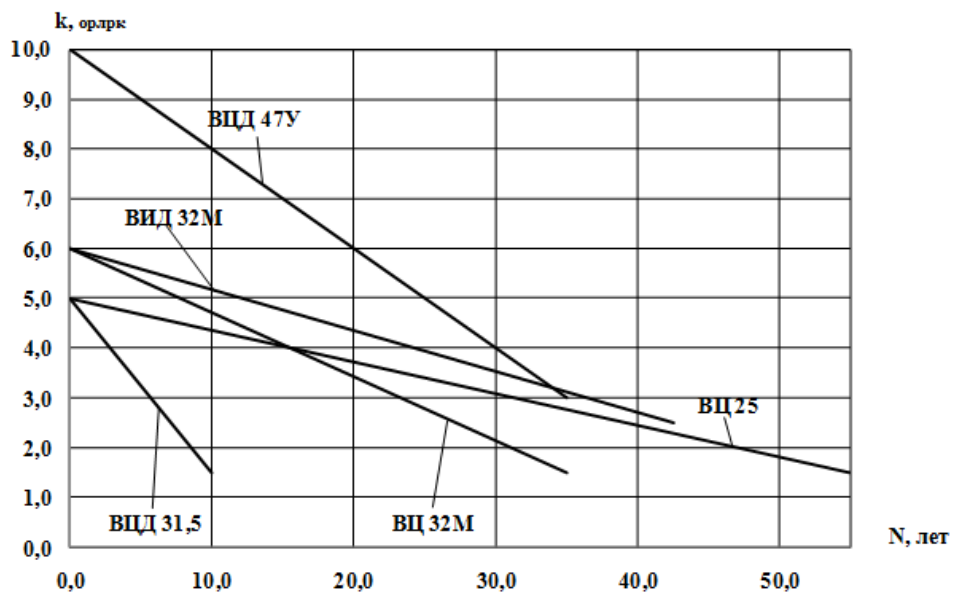


Рис.1. Зависимости коэффициента остаточного ресурса лопаток рабочих колес от срока эксплуатации вентиляторов

Эти данные позволяют произвести предварительную оценку остаточного ресурса для различных вентиляторов в зависимости от срока их службы на шахтах. При эксплуатации вентиляторов более 35...40 лет они должны подвергаться экспертно-техническому обследованию каждые 0,5 года, но не реже 1 раза в год с обязательным учетом коррозионного воздействия на них агрессивной шахтной среды.

На рис. 2 представлена область безопасной эксплуатации вентиляторных установок главного проветривания с радиальными (центробежными) вентиляторами ВЦД31,5, ВЦ32, ВРЦД4,5 с различными профилями

лопаток и схемами рабочих колес, которая определяется минимально допустимыми значениями толщины обшивок лопаток. При этом приведены сравнительные данные при одинаковых начальных толщинах обшивок лопаток вентиляторов. На основании анализа данных многолетних экспериментальных исследований толщин обшивок лопаток с учетом их коррозионного износа за время эксплуатации вентиляторных установок на шахтную сеть была выделена область остаточных ресурсов, обозначенная на рис. 2 четырёхугольником АБВГ. В этой области только один вентилятор ВЦ32 после 34 лет эксплуатации (при нормативном сроке службы 14 лет) имел аварийные последствия, о чем было сказано выше. Вентиляторы ВЦД31,5 и ВРЦД4,5 характеризовались тем, что первый не достиг нормативного срока эксплуатации 14 лет на шахте «Краснолиманская-Западная» и был заменен новым вентилятором, а второй ВРЦД4,5 должен быть заменен в ближайшее время. Все 3 типа вентиляторов имели минимально допустимую толщину обшивок лопаток, которая составляет 2 мм. Можно утверждать, что область их безопасной эксплуатации определяется значениями толщин обшивок лопаток, расположенными в области АБВГ (рис. 2).

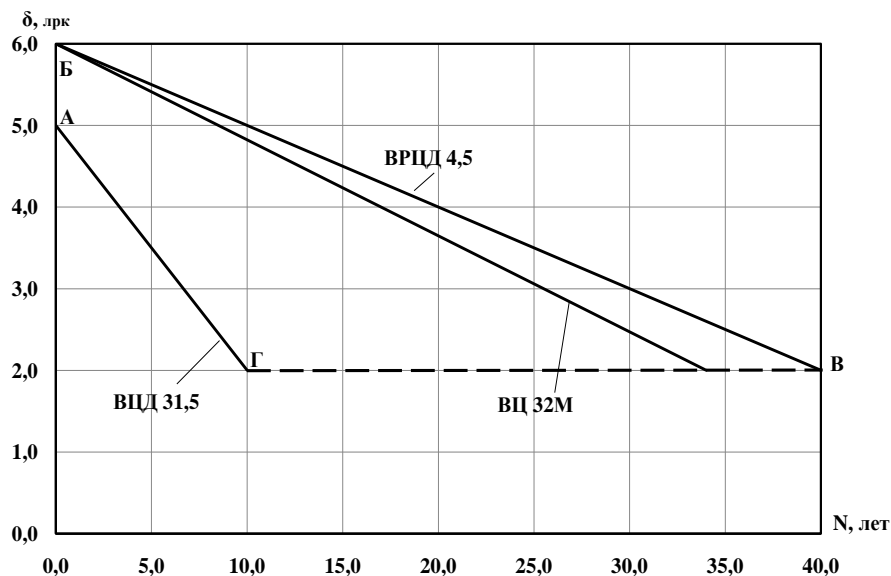


Рис.2. Зависимости толщины обшивки лопаток рабочего колеса от срока эксплуатации вентиляторов

Экспериментальные исследования износа по фактору коррозии показывают необходимость учета скорости коррозии на процесс разрушения рабочих колес вентиляторов, которая зависит от агрессивности среды перекачиваемого воздуха, качества и типа стали, из которых изготовлены колеса, технологии изготовления и других параметров. Как показал анализ

литературных источников [8,13] и условий эксплуатации, скорость коррозионного износа V может быть представлена эмпирической формулой:

$$V = \frac{c}{\varepsilon \sqrt{F}}, \text{ мм}, \quad (3)$$

где c и ε – постоянные величины, характеризующие свойства металлов, из которых изготовлены детали рабочих колес вентиляторов;

F – площадь поперечного сечения коррозионного слоя износа лопатки колеса, мм².

Как видно из формулы, скорость коррозионного износа обратно пропорциональна площади коррозионного износа, что согласуется с практическими данными, (см. рис. 2).

Приведенная математическая аналогия этих двух независимых процессов показывает, что предложенный комплексный метод оценки остаточных ресурсов лопаток колес и других элементов вентиляторов главного проветривания является обоснованным и дает возможность своевременно оценить наступление предельно допустимого состояния, предотвратить аварийную ситуацию и повысить безопасность их эксплуатации.

На рис. 3 представлены графические зависимости коэффициентов остаточных ресурсов обшивок лопаток радиальных вентиляторов от времени эксплуатации при механическом и коррозионном износе.

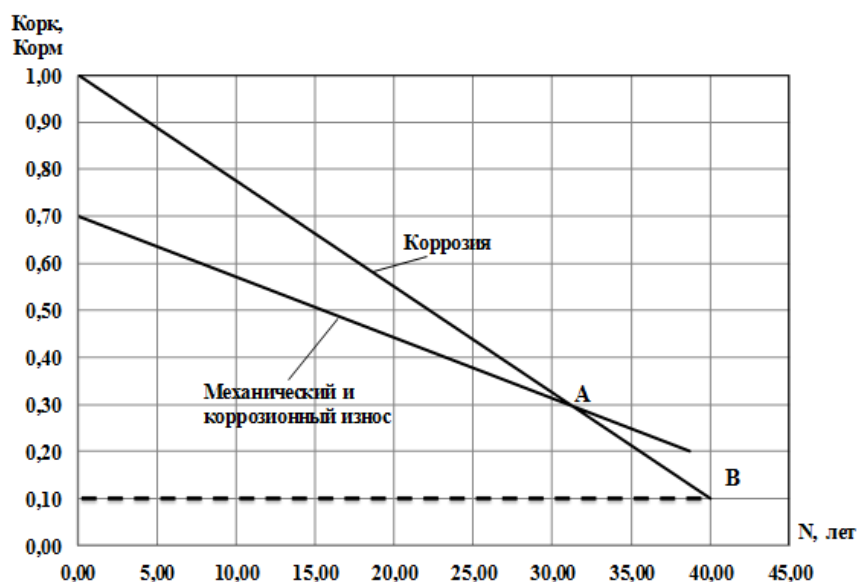


Рис. 3. Графические зависимости коэффициентов остаточных ресурсов обшивок лопаток радиальных вентиляторов от времени эксплуатации вентиляторных установок при механическом и коррозионном износе

Координаты точки А (рис. 3) пересечения двух прямых линий позволяют выполнить объективную оценку приближения эксплуатационных характеристик вентиляторов к минимально допустимым значениям по степени износа рабочих колес вентиляторов, после которых их эксплуатация не является безопасной. Выполненный анализ коррозионного и механического износа элементов проточной части роторов вентиляторов позволяет сделать вывод о необходимости оценки остаточного ресурса с учетом этих двух факторов.

Предельные значения коэффициентов остаточных ресурсов обшивок лопаток и дисков роторов радиальных вентиляторов и лопаток осевых вентиляторов определены в [11].

Ведущие специалисты по шахтным вентиляторам, а также машинам, применяемым в теплоэнергетических установках [5, 7, 11], отмечают, что коррозия на поверхности вала вентилятора главного проветривания через 3-5 лет их работы дополнительно снижает предел выносливости вала до 40-50% своего первоначального значения. Это относится к сечениям участков вала, расположенным в проточной части вентилятора, а участки у подшипников постоянно смазываются в достаточном объеме, поэтому они практически не подвергаются воздействию коррозии. При этом выносливость вала в основном определяется конструктивными формами вала в местах перехода между ступенями и зависит от возникновения концентраторов напряжений изгиба и кручения.

Координаты точки А (рис. 3) дают основание определить возможность дальнейшей эксплуатации ротора конкретного типа вентилятора или его замены новым образцом для безопасной эксплуатации вентиляторной установки.

Для реализации предложенного комплексного метода определения остаточного ресурса вентилятора главного проветривания выполняются следующие действия:

- при помощи ультразвукового толщиномера необходимо экспериментально определить толщину обшивки лопатки колеса между коренным и покрывным дисками на рабочей поверхности лопатки;
- установить степень агрессивности воздушной среды;
- определить толщину «живого» металла расчетным методом при скорости коррозии: 0,1 мм в год для неагрессивной среды и при 0,2 мм в год для агрессивной среды за время эксплуатации вентиляторной установки на шахтную сеть;
- определить показатель остаточного ресурса обшивки лопатки, принимая минимальную толщину живого металла при коррозионном износе и по замерам ультразвуковым толщиномером;
- по коэффициентам остаточного ресурса лопаток и дисков определить возможность дальнейшей эксплуатации рабочего колеса и вентилятора по приведенным в [11] критериям.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемый метод определения коэффициентов остаточных ресурсов рабочих колес вентиляторов главного проветривания шахт позволяет более эффективно оценить их техническое состояние и повышает уровень их безопасной эксплуатации.
2. Предложен метод определения остаточного ресурса вентилятора главного проветривания и его элементов с учетом коррозионного и механического износов.
3. При продлении срока службы вентиляторной установки до 5 лет следует учитывать, что в заводской документации указан нормативный срок службы вентилятора, а не всей вентиляторной установки [1, 14].
4. Возникновение поломок при относительно малом уровне переменных напряжений объясняется снижением прочности конструкции из-за коррозии, возникающей при трении частиц в местах контакта лопаток с диском при непрерывном увеличении числа циклов знакопеременных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности в угольных шахтах: НПАОП-10.0 1.01.-10. – [Офиц. изд.]. – Харьков: Форт, 2010. – 256 с.
2. Стешенко В.А. Исследование напряженного состояния рабочих колёс шахтных вентиляторов главного проветривания, отработавших нормативные сроки службы /В.А. Стешенко, Е.В.Голошная// Проблемы експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: зб. наук. пр./ НДІГМ ім. М.М. Федорова. – Донецьк: НДІГМ ім. М.М. Федорова, 2008-2009. – Вип. 102-103. – С. 150-163.
3. Горлышкин В.Т. Напряженное состояние в дисках центробежных вентиляторов от боковой загрузки лопаток / В.Т. Горлышкин // Шахтные стационарные установки. – М.: Недра, 1972. – Вып. 26. – С. 74-76.
4. Бабак Г.А. Исследование напряженного состояния рабочего колеса вентилятора ВЦД40 /Г.А. Бабак, А.В. Якименко// Вопросы горной механики. – М.: Недра, 1970. – Вып. 21. – С. 82-94.
5. Центробежные вентиляторы / [Брук А.Д., Матикашвили Т.И., Невельсон М.И. и др.]; под. ред. Соломаховой Т.С. – М.: Машиностроение, 1975. – 416с.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов /Феодосьев В.И. – М.: Наука, 1970. – 544 с.
7. Ковалевская В.И. Шахтные центробежные вентиляторы /Ковалевская В.И., Бабак Г.А., Пак В.В. – М.: Недра, 1979. – 320 с.

8. Кудрейко Н.А. Влияние шахтной среды на коррозию стационарного оборудования /А.Н. Кудрейко, Ю.А. Агарев, Н.А. Ковалев// Проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности в условиях высокой техногенной нагрузки в Донбассе: сб. науч. тр./ НИИГМ им. М.М.Фёдорова. – Донецк: НИИГМ им. М.М.Фёдорова, 2003. – Вып. 97. – С. 56-59.

9. Бугаев А.В. Определение допустимой степени износа рабочих колес шахтных радиальных вентиляторов, отработавших нормативные сроки службы /А.В. Бугаев, А.В. Клименко, В.А. Стешенко// Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: зб. наук. пр. /НДІГМ ім. М.М. Федорова. – Донецьк: НДІГМ ім. М.М. Федорова, 2010-2011. – Вип. 104-105. – С. 266-280.

10. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту шахтных вентиляторных установок главного проветривания. – М.: Недра, 1983. – 133с.

11. Шахтні вентиляційні установки. Оцінка стану елементів робочих коліс вентиляторів головного провітрювання шахт, які відробили нормативний термін: СОУ-Н 10.1.00174094.011: 2008. – Офіц. вид. – К.: Мінвуглепром України, 2008. – 35 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України).

12. Толошная Е.В. Экспериментальные исследования по определению толщины обшивок профильной лопатки радиального вентилятора /Е.В.Толошная, С.Е.Роев// Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: зб. наук. пр./ НДІГМ ім. М.М. Федорова. – Донецьк: НДІГМ ім. М.М. Федорова, 2005. – Вип. 104-105. – С. 177-184.

13. Гутер Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта /Гутер Р.С., Овчинский Б.В. – М., 1970 – 432 с.

14. Вентиляторы шахтные главного проветривания. Технические условия: ГОСТ 11004-84-92. – [Введен 1991.06.15] – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 33 с.

Получено: 27.04.17

A complex method for estimating the residual life of radial fans rotors in the course of their long-term operation is developed, based on the application of the laws of resistance of materials to the elements of rotors and the criteria for the maximum values for wear of disks and blades of impellers of radial and axial fans. Application of the technique ensures the safety of operation of mine ventilation plants during the time period, which exceeds the normative service life.

Keywords: fans, wear, mine environment, working wheel, service time, corrosion, methodology, shoulder roller, diagnostics, coefficient.