

А. И. САФОНОВ, канд. техн. наук (Белорусский национальный технический университет, г. Минск),  
 А. С. ГАЛЮЖИН, канд. техн. наук (Белорусско-Российский университет, г. Могилев),  
 e-mail: deanmef@bntu.by

## Повышение надежности пневмоприводов применением центробежно-магнитной осушки сжатого воздуха

Приведены схема и принцип действия центробежно-магнитного влагоотделителя, применяемого в системах кондиционирования сжатого воздуха пневмоприводов. Проанализированы причины низкой эффективности влагоотделителей центробежно-адсорбционного типа. Приведены результаты сравнительных стендовых и эксплуатационных испытаний штатного и центробежно-магнитного влагоотделителей.

**Ключевые слова:** пневмопривод, сжатый воздух, система кондиционирования, удаление конденсата, центробежно-магнитный влагоотделитель.

The scheme and the operating principle of a centrifugal-magnetic moisture separator, utilized in pressurized air conditioning systems of pneumatic drives, are presented. The reasons of low effectiveness of moisture separators of centrifugal-adsorption type are analyzed. The results of comparative bench and operational tests of typical and centrifugal-magnetic moisture separators are presented.

**Keywords:** pneumatic drive, pressurized air, conditioning system, condensate removal, centrifugal-magnetic moisture separator.

В конструкции современных мобильных машин широкое распространение получил пневматический привод, в котором рабочим телом является сжатый воздух. От качества сжатого воздуха во многом зависит надежность элементов пневмопривода. Существенное значение имеет осушка, т. е. удаление из сжатого воздуха воды как в жидком, так и парообразном состоянии, поскольку в наиболее удаленных от компрессора элементах пневмопривода из-за охлаждения возможна конденсация парообразной воды. При эксплуатации мобильной машины в условиях отрицательных температур конденсированная влага замерзнет, что может вызвать отказ пневмопривода. Это наиболее опасно при движении мобильной машины с пневматической тормозной системой, так как может привести к дорожно-транспортному происшествию.

Следует отметить, что вода является хорошим растворителем и в ней растворяются почти все газообразные примеси, содержащиеся в воздухе. Образовавшаяся агрессивная смесь вызывает ускорен-

ную коррозию всех элементов, соприкасающихся со сжатым воздухом. Кроме того, водой смывается смазка с трущихся поверхностей элементов пневмопривода и увеличивается их износ.

**Объекты исследований.** На троллейбусах производства холдинга "Белкоммунмаш" в системе кондиционирования сжатого воздуха пневмопривода используется центробежно-адсорбционный влагоотделитель собственного производства [1], схема которого приведена на рис. 1. Данный влагоотделитель работает следующим образом. Сжатый воздух по трубке 5, установленной по касательной снаружи на корпусе 1, поступает в пространство между корпусом 1 и стаканом 2 и далее движется по винтовой траектории вниз благодаря винтовой поверхности 11. Под действием центробежных сил инерции капли воды, масла и твердые частицы оседают на стенках корпуса 1 и стекают вниз. Затем воздух проходит через латунную загрузку 10, где также задерживаются твердые частицы и мелкие капли воды и масла, далее — через слой адсорбента 9, который поглощает несконденсированную влагу. После очистки и осушки сжатый воздух через обратный клапан 6 поступает в рабочие ресиверы

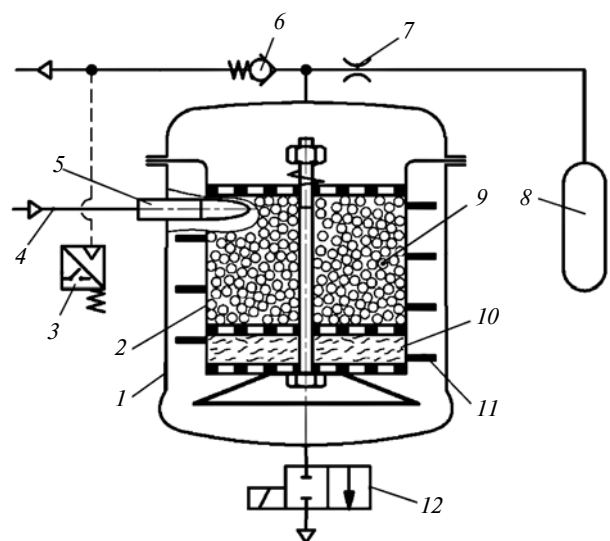


Рис. 1. Схема влагоотделителя АКСМ 201-2302 холдинга "Белкоммунмаш"

пневмопривода, а через дроссель 7 — в ресивер 8 регенерации.

При достижении в рабочих ресиверах верхнего предела регулирования давления срабатывает реле 3 давления и отключает электродвигатель компрессора и обмотку электромагнитного клапана 12. В результате нижняя полость корпуса 1 соединяется с атмосферой и, соответственно, давление в магистрали 4 и внутри корпуса 1 осушителя падает практически до атмосферного. Сжатый очищенный и осушенный воздух из ресивера 8 через дроссель 7 поступает в верхнюю часть корпуса 1, проходит через адсорбент 9 и латунную загрузку 10, где отбирает ранее накопленную влагу и через клапан 12 выходит в атмосферу.

Когда давление в ресиверах пневмопривода из-за расхода сжатого воздуха потребителями падает до нижнего предела, реле 3 давления включает электродвигатель компрессора. В результате подается напряжение на обмотку электромагнитного клапана 12, который перекрывает сообщение внутренней полости корпуса 1 влагоотделителя с атмосферой, и цикл осушки и очистки повторяется.

Данная система регенерации адсорбента, включающая ресивер 8 и дроссель 7, обладает сравнительно низкой эффективностью, что объясняется следующим. Из-за теплообмена с окружающей средой температура сжатого воздуха в ресивере 8 всегда ниже температуры осушаемого сжатого воздуха во влагоотделителе. После прохождения дросселя из-за наличия эффекта Джоуля—Томсона сжатый воздух опять охлаждается [2, с. 199—201], в результате чего способность воздуха к поглощению влаги из адсорбента снижается. Кроме того, из-за имеющегося в конструкции осушителя зазора в несколько миллиметров между винтовой поверхностью 11 и корпусом 1 движение сжатого воздуха по спирали происходит только в начальный период при его поступлении в пространство между корпусом 1 и стаканом 2 из трубки 5. Затем основная часть воздуха проходит через кольцевой зазор, а не движется по спирали, так как зазор обеспечивает меньшее аэродинамическое сопротивление, чем винтовой канал. Это снижает эффективность отделения конденсата в виде капель воды.

Разработанный в Белорусском национальном техническом университете центробежно-магнитный влагоотделитель (рис. 2) не имеет упомянутых недостатков. Центробежно-магнитный влагоотделитель состоит из корпуса 1, в котором соосно установлен сердечник 10. На внешней поверхности сердечника расположен направляющий аппарат 2, обеспечивающий движение потока сжатого воздуха по винтовой траектории. В нижней части корпуса 1 размещена конусообразная заслонка 13, под которой находится полость 16 для сбора конденсата и

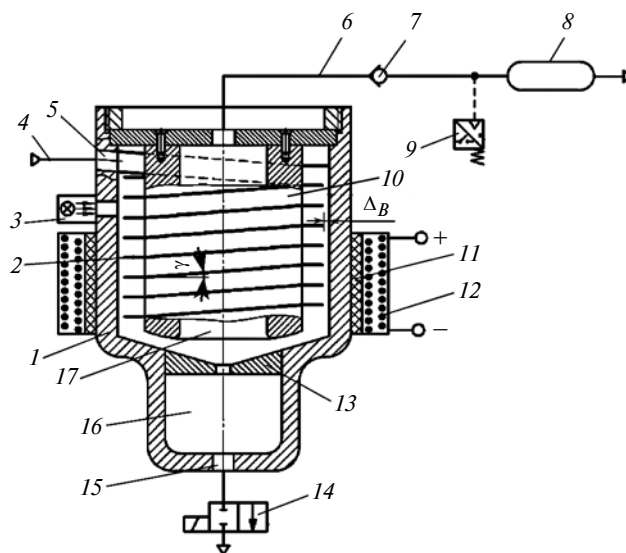


Рис. 2. Схема центробежно-магнитного влагоотделителя

пыли. Полость 16 через отверстие 15 соединена с электромагнитным клапаном 14. Снаружи на корпусе 1, выполненном из немагнитного материала (сплава алюминия), установлен соленоид (цилиндрическая катушка) 12. Для предотвращения нагрева корпуса 1 соленоидом 12 имеется теплоизоляционная прокладка 11. На корпусе 1 размещено устройство 3 для ионизации частиц воды в сжатом воздухе.

Влагоотделитель работает следующим образом. От компрессора сжатый воздух по трубопроводу 4 через отверстие 5 в корпусе 1 поступает в канал, образованный направляющим аппаратом 2. Для исключения возникновения местных вихрей, в которых частицы воды движутся хаотично, отверстие 5 выполнено под наклоном, равным углу  $\gamma$  подъема винтовой линии направляющего аппарата 2. Кроме того, вход потока сжатого воздуха в направляющий аппарат происходит по касательной к винтовой линии, чем также исключается появление местных вихрей.

Как правило, в потоке сжатого воздуха находятся капли воды (конденсат), образовавшиеся в результате сжатия влажного воздуха. Поэтому первоочередной задачей является удаление этих капель из потока сжатого воздуха, что реализуется путем использования центробежной силы инерции. При этом капли воды достигают внутренней вертикальной стенки корпуса 1 и стекают вниз в полость 16.

При дальнейшем движении потока сжатого воздуха по винтовой линии частицы воды, имеющие большую массу, чем молекулы азота и кислорода, располагаются ближе к вертикальным внутренним стенкам корпуса 1. Через несколько оборотов поток сжатого воздуха подвергается ультрафиолетовому облучению с помощью ионизатора 3. Части-

цы воды, находящиеся ближе молекул кислорода и азота к источнику ионизации, первыми приобретают положительный заряд. При этом поток воздуха входит в магнитное поле, образованное соленоидом 12, и электроны, выбитые из частиц воды, под воздействием силы Лоренца устремляются к оси сердечника 10, а положительно заряженные частицы воды — к вертикальным стенкам корпуса 1. Вертикальные стенки к этому моменту уже покрыты тонким слоем воды, так как ее капли, образующиеся при сжатии воздуха, первыми достигают стенок корпуса еще до облучения потока сжатого воздуха. Положительно заряженные частицы воды, достигшие ее слоя на стенках корпуса, соединяются с имеющимися там молекулами воды и удерживаются за счет наличия водородной связи. Выбитые из частиц воды электроны преимущественно захватываются электрически нейтральными молекулами кислорода и азота, внешние электронные оболочки которых не заполнены, а также положительными молекулярными ионами кислорода и азота, из которых электроны будут выбиты при ультрафиолетовом облучении потока сжатого воздуха. Капли масла и твердые частицы пыли, находящиеся в сжатом воздухе, под воздействием центробежных сил инерции также отбрасываются к внутренней стенке корпуса 11, и образовавшаяся смесь стекает вниз, в полость 16.

Как уже отмечалось, магнитное поле внутри корпуса 1 создается с помощью соленоида 12, вектор магнитной индукции которого направлен вниз параллельно оси влагоотделителя и под углом  $\alpha = 90^\circ - \gamma$  к вектору окружной скорости движения ионизированной частицы воды. При этом на ионизированные частицы воды, кроме центробежной силы, воздействует сила Лоренца, которая совпадает по направлению с центробежной силой. Радиальная сила, действующая на частицу, в этом случае возрастает в десятки раз.

С помощью направляющего аппарата 2 поток сжатого воздуха также получает нисходящее движение. После прохождения по винтовой траектории он поворачивается на  $180^\circ$  и поступает во внутреннее отверстие 17 сердечника 10. При этом возникает центробежная сила, действующая на оставшиеся твердые частицы, частицы воды и капли масла и направленная в сторону конусообразной заслонки 13, куда стекает смесь воды, масла и твердых частиц со стенок корпуса 1. Сила Лоренца в этом случае уменьшается до нуля, так как вектор скорости становится параллельным вектору магнитной индукции. Через отверстие в центре заслонки 13 упомянутая смесь стекает в полость 16, где и собирается. Благодаря такой конструкции заслонки 13 собранная смесь твердых частиц, масла и воды не захватывается вновь потоком очищенно-

го и осушенного воздуха и не увлекается в пневмопривод.

Осушенный и очищенный сжатый воздух проходит через отверстие 17, трубопровод 6, обратный клапан 7 и поступает в основной ресивер 8. Когда давление в пневмоприводе достигает верхнего предела, срабатывает реле 9 давления и отключает электродвигатель компрессора, обмотку соленоида и обмотку электромагнитного клапана 14. В результате запорный элемент клапана 14 опускается вниз и полость 16 соединяется с атмосферой. Под действием давления воздуха, находящегося в корпусе 1, смесь воды, масла и твердых частиц выбрасывается наружу.

При падении давления в ресивере пневмопривода до нижнего предела из-за расхода сжатого воздуха потребителями реле 9 давления включает электродвигатель компрессора и подает напряжение на обмотку соленоида и обмотку электромагнитного клапана 14, который перекрывает сообщение внутренней полости 16 с атмосферой, и цикл осушки и очистки сжатого воздуха повторяется.

Таким образом, разработанный центробежно-магнитный влагоотделитель по сравнению с известными адсорбирующими влагоотделителями обладает рядом преимуществ: не требуется постоянная регенерация или замена адсорбента; во влагоотделителе использован всего один подвижный элемент — запорный элемент электромагнитного клапана; снижены потери энергии на преодоление гидравлических сопротивлений.

**Сравнительные испытания устройств осушки сжатого воздуха и их результаты.** Для сравнительной оценки эффективности разработанного влагоотделителя проведены стендовые и дорожные испытания следующих устройств осушки сжатого воздуха: "Сиккомат", АКСМ 201-2302, разработанный центробежно-магнитный влагоотделитель. Испытания проводили при различных значениях температуры и относительной влажности атмосферного воздуха. Результаты приведены в таблице.

Основные показатели сжатого воздуха (точка росы, степень осушки и класс чистоты) на выходе предложенного центробежно-магнитного влагоотделителя на  $4,9 \div 7,6$  % выше аналогичных показателей сжатого воздуха на выходе влагоотделителя АКСМ 201-2302 с новым адсорбентом и в  $1,62 - 1,99$  раза выше, чем у влагоотделителя АКСМ 201-2302 с адсорбентом после 10 тыс. км пробега троллейбуса. При экспериментальных исследованиях аналогичные показатели устройства "Сиккомат" оказались самыми низкими. Так, степень осушки сжатого воздуха с их помощью не превышала 27 %. При использовании таких устройств на троллейбусе в условиях отрицательных температур окружающей среды неизбежен отказ пневмопривода из-за

замерзания конденсата, что подтверждается опытом эксплуатации троллейбусов Могилевского предприятия "Горэлектротранспорт".

Испытания проводили следующим образом. Каждый из осушителей поочередно устанавливали на троллейбус модели АКСМ 201. Через каждые 10 тыс. км пробега воздухоосушитель снимали и на специализированном стенде определяли вышеупомянутые параметры. Результаты эксперимента приведены в таблице и на рис. 3. Анализ зависимостей показал, что уже через 10 тыс. км пробега степень осушки воздуха при использовании осушителя АКСМ 201-2302 существенно снижается (приблизительно в 2 раза) и становится примерно такой же, как и при использовании осушителя "Сиккомат" (см. таблицу). Кроме того, после 17,5 тыс. км пробега троллейбуса воздухоосушитель АКСМ 201-2302 вскрыли и провели визуальную оценку состояния адсорбента. Адсорбент был влажным, его наружная поверхность была покрыта масляной пленкой. Данные результаты в совокупности свидетельствуют о низкой эффективности системы регенерации адсорбента.

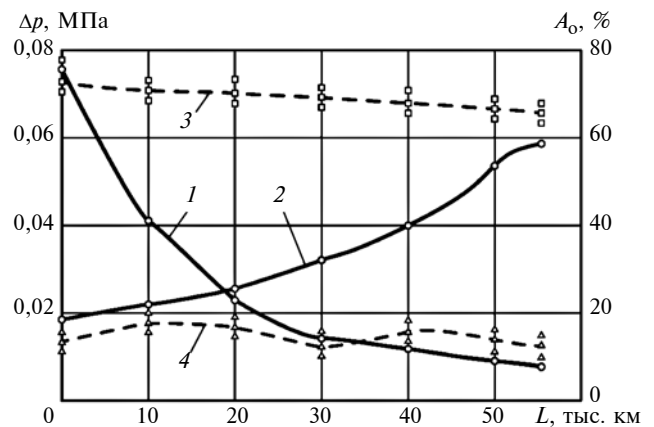


Рис. 3. Зависимости степени  $A_0$  осушки сжатого воздуха (кривые 1, 3) и потерь  $\Delta p$  давления (кривые 2, 4) от пробега  $L$  троллейбуса:

1, 2 — во влагоотделителе АКСМ 201-2302; 3, 4 — в центробежно-магнитном влагоотделителе;  $\circ$ ,  $\Delta$ ,  $\square$  — данные работ [3–5] соответственно

Испытания разработанного центробежно-магнитного влагоотделителя на том же троллейбусе показали следующее. С увеличением пробега от 0 до 65 тыс. км степень осушки сжатого воздуха умень-

Результаты экспериментальных стендовых исследований различных устройств осушки сжатого воздуха

Тип устройства осушки сжатого воздуха	Показатели атмосферного воздуха		Показатели сжатого воздуха после осушки		Точка росы сжатого воздуха $T_{p,сж.вых.}, ^\circ C$	Класс чистоты по ISO 8573-1:2001	Степень осушки воздуха $A_0, \%$
	Температура $T_{атм}, ^\circ C$	Относительная влажность $\varphi_{атм}, \%$	Температура $T_{сж.вых.}, ^\circ C$	Относительная влажность $\varphi_{сж.вых.}, \%$			
"Сиккомат" (независимо от пробега)	-7,3	100	7,6	84	4,6	4; 5	36,6
	4,4	82	9,7	83	7,2	5; 6	33,3
	11,2	67	16,4	84	13,5	> 6	31,4
	17,6	56	21,7	85	21,7	> 6	28,6
	28,5	42	32,3	87	29,7	> 6	26,9
АКСМ 201-2302 с новым адсорбентом	-6,3	94	8,4	17	-14,4	3; 4	86,5
	4,4	87	10,1	26	-8,5	3; 4	80,7
	16,7	82	19,7	31	1,1	3; 4	75,7
	22,3	76	29,2	33	10,3	> 6	73,4
	27,8	66	34,9	36	16,6	> 6	70,6
АКСМ 201-2302 после пробега 10 тыс. км	-5,1	84	7,7	64	0,8	3; 4	54,3
	5,7	86	12,1	69	6,2	> 6	52,4
	12,6	78	17,3	77	12,9	> 6	47,5
	19,2	64	27,7	84	24,6	> 6	43,3
	26,1	62	34,3	88	31,9	> 6	37,2
Центробежно-магнитный (независимо от пробега)	-9,3	83	7,4	18	-14,6	3; 4	88,1
	6,4	84	12,8	24	-7,3	3; 4	83,4
	12,1	86	18,1	28	-1,6	3; 4	77,4
	18,7	92	26,8	30	7,9	4; 5	74,8
	29,6	52	36,5	31	15,8	> 6	74,2

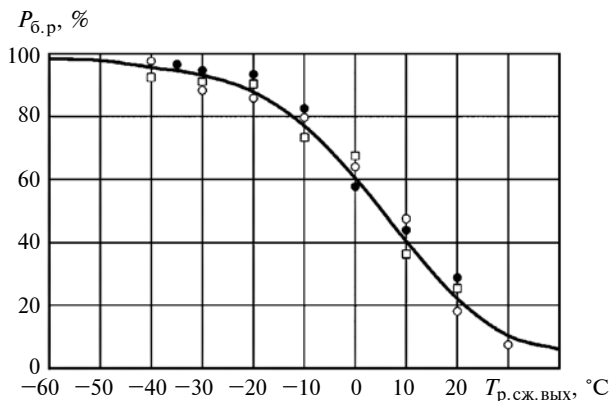


Рис. 4. Вероятность  $P_{б.р.}$  безотказной работы пневмопривода из-за отсутствия замерзания конденсата в зависимости от точки росы ( $T_{р.сж.вых.}$ ) сжатого воздуха на выходе влагоотделителя (○, ●, □ — данные работ [3, 4, 5] соответственно)

шилась незначительно (приблизительно на 6,4 %), что связано с появлением масляной пленки на вертикальной внутренней стенке корпуса влагоотделителя. Эта пленка ухудшает сцепление микрочастиц воды с молекулами тонкого слоя воды на упомянутой стенке. Поэтому через 20÷30 тыс. км пробега (приблизительно один раз в полгода) необходимо удалять масляную пленку с внутренней цилиндрической поверхности корпуса.

Постановку и обработку результатов экспериментальных исследований сравниваемых объектов проводили путем проверки принадлежности каждого двух серий результатов экспериментов (выборки) к одной генеральной совокупности. Задачу решали проверкой нулевой гипотезы  $H_0$  с помощью критерия Вилкоксона для случая, когда объем обеих выборок не превышает 25. Выбравку грубых ошибок измерений проводили с помощью правила "трех сигм" [6, с. 117—130; 7, с. 202—216; 8, с. 409—441; 9; 10].

Как известно, одним из важных свойств любого технического объекта, в том числе и пневмопривода, является надежность, которая определяется следующими качественными показателями: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. При эксплуатации пневмопривода мобильной машины при отрицательных температурах окружающей среды из-за образования ледяных пробок и примерзания подвижных элементов пневмоаппаратов может наступить отказ пневмопривода, т. е. повышение степени осушки сжатого воздуха, несомненно, повышает безотказность, а следовательно, и надежность пневмопривода. Данная взаимосвязь исследовалась в работах [3—5]. В частности, в них оценивали вероятность отказов пневмоприводов по причине замерзания конденсата в зависимости от точки росы сжатого воздуха. При этом показано, что применительно к пневмопри-

водам мобильных машин для повышения вероятности их безотказной работы точка росы сжатого воздуха на выходе устройства осушки должна находиться в области отрицательных температур. Это означает, что согласно ISO 8573-1:2001 сжатый воздух должен соответствовать по точке росы классу чистоты не ниже 4-го. Для получения зависимости вероятности отказов пневмоприводов по причине замерзания конденсата в зависимости от точки росы сжатого воздуха (в соответствии с ISO 8573-1:2001) использованы данные, приведенные в работах [3—5]. При этом температуру  $T_{сж.вых.}$  сжатого воздуха на выходе влагоотделителя в соответствии с рекомендациями работы [3, с. 13] принимали выше температуры окружающей среды на 4 °С. Эти результаты обработаны с помощью программы Excel, и получено уравнение регрессии, позволяющее расчетным путем определять вероятность  $P_{б.р.}$  безотказной работы пневмопривода из-за отсутствия замерзания конденсата в зависимости от точки росы ( $T_{р.сж.вых.}$ ) сжатого воздуха на выходе влагоотделителя:

$$P_{б.р.} = a_{в1} T_{р.сж.вых.}^6 + a_{в2} T_{р.сж.вых.}^5 + a_{в3} T_{р.сж.вых.}^4 + a_{в4} T_{р.сж.вых.}^3 + a_{в5} T_{р.сж.вых.}^2 + a_{в6} T_{р.сж.вых.} + a_{в7}, \quad (1)$$

где  $a_{в1}, \dots, a_{в7}$  — коэффициенты регрессии:  $a_{в1} = -0,21 \cdot 10^{-8}$ ,  $a_{в2} = 0,1256 \cdot 10^{-6}$ ,  $a_{в3} = 0,104 \cdot 10^{-4}$ ,  $a_{в4} = 0,685 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_{в5} = -0,0172$ ,  $a_{в6} = -1,8933$ ,  $a_{в7} = 60,3$ .

Зависимость (1) и данные работ [3—5] приведены на рис. 4.

Как было отмечено ранее, при наличии конденсата в пневмоприводе его отказ из-за образования ледяных пробок и примерзания подвижных элементов возможен при охлаждении элементов пневмопривода до отрицательных температур. Наиболее неблагоприятными при этом являются условия, при которых мобильная машина работает продолжительное время при невысокой положительной температуре атмосферного воздуха (3÷6 °С), а затем во время перерыва в работе, когда машина находится на открытой стоянке, температура окружающей среды снижается до отрицательной величины. Так, согласно статистическим данным эксплуатации троллейбусов при описанных условиях Могилевского предприятия "Горэлектротранспорт", около 60 % троллейбусов ЗИУ, АКСМ 101 и до 30 % троллейбусов АКСМ 201 с пробегом более 10 тыс. км после замены или восстановления адсорбента утром не могут выйти на линию из-за отказа пневмопривода. У троллейбусов АКСМ 201 с новым или вос-

становленным адсорбентом в осушителе таких проблем не наблюдалось.

С использованием полученного уравнения (1) и приведенных выше результатов исследований пневмоприводов с различными осушителями было установлено, что при применении влагоотделителя АКСМ 201-2302 с новым адсорбентом вероятность безотказной работы пневмопривода при отрицательной температуре атмосферного воздуха будет достигать 80,3 %. В случае небольших положительных температур атмосферного воздуха (до 10 °С) при последующем его охлаждении ниже 0 °С данная вероятность снижается до 62,1 %. После 10 тыс. км пробега упомянутая вероятность снижается соответственно до 58,2 и 49,4 %. Установка в пневмопривод центробежно-магнитного влагоотделителя позволяет достичь более высокой вероятности безотказной работы. Так, при отрицательных температурах атмосферного воздуха данная вероятность достигает 83,7 %. При небольших положительных температурах атмосферного воздуха и последующем его охлаждении ниже 0 °С эта вероятность составляет 77,2÷79,6 %.

Таким образом, вероятность безотказной работы пневмопривода с центробежно-магнитным влагоотделителем выше вероятности безотказной работы пневмопривода с влагоотделителем АКСМ 201-2302 с новым адсорбентом на 3,4÷15,1 %. С увеличением пробега троллейбуса степень осушки сжатого воздуха влагоотделителем АКСМ 201-2302 существенно уменьшается (см. таблицу и рис. 4) и, следовательно, снижается вероятность безотказной работы пневмопривода. Так, после пробега 10 тыс. км вероятность безотказной работы пневмопривода с влагоотделителем АКСМ 201-2302 ниже вероятности безотказной работы пневмопривода с центробежно-магнитным влагоотделителем на 25,5÷27,8 %.

При температуре атмосферного воздуха более 20 °С осушить сжатый воздух до достижения точки росы в области отрицательных температур достаточно сложно из-за большого содержания парообразной влаги в атмосфере. Так, при одинаковой относительной влажности содержание парообразной влаги при температуре атмосферного воздуха 20 °С в 2,52 раза больше, чем при температуре 5 °С. Вместе с тем при эксплуатации пневмопривода в климатических условиях со стабильно высокими температурами вероятность замерзания конденсата очень мала, так как, например, уменьшение температуры атмосферного воздуха с +20 до -2 °С за сутки маловероятно.

Для оценки на практике безотказности работы пневмопривода троллейбуса с центробежно-магнитным влагоотделителем в осенне-зимний период в

течение четырех месяцев вели статистику отказов пяти троллейбусов АКСМ 201 со штатными устройствами осушки сжатого воздуха АКСМ 201-2302 и одного троллейбуса АКСМ 201 с центробежно-магнитным влагоотделителем. За период наблюдений было определено среднее число отказов пневмопривода перед выходом троллейбуса на маршрут (приходящееся на один троллейбус) из-за замерзания конденсата, которое для троллейбуса с влагоотделителем АКСМ 201-2302 составило 3,2 отказа, в то время как у троллейбуса с центробежно-магнитным влагоотделителем отказов пневмопривода не было. После каждого отказа пневмопривода штатное устройство осушки АКСМ 201-2302 разбирали и оценивали состояние адсорбента. Во всех случаях адсорбент был влажным, что подтверждает низкую эффективность системы его регенерации.

Таким образом, по результатам испытаний разработанный центробежно-магнитный влагоотделитель может быть рекомендован к промышленному применению в пневмоприводах транспортных и технологических машин с целью повышения их надежности и безопасности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ.

1. **ТУ РБ 28619445—2000.** Блок подготовки воздуха. Минск: Белкоммунмаш, 2000. 19 с.
2. **Нащокин В. В.** Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособ. для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 1980. 469 с.
3. **Гурьянов В. В.** Прогнозирование и пути предотвращения отказов автомобильной пневмосистемы из-за замерзания конденсированной влаги: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 173 с.
4. **Гринюк А. С.** Экспериментальное исследование изменения параметров работоспособности и отказов аппаратов пневматических тормозных приводов автомобилей: Дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1980. 152 с.
5. **Исследование** работы пневматических тормозных аппаратов при отрицательной температуре и эффективности способов очистки сжатого воздуха от влаги: Отчет о НИР № ГР 71019174 / Полтавск. автоагр. з-д; рук. темы М. И. Дронин. Полтава, 1992. 142 с.
6. **Митков А. Л., Кардашевский С. В.** Статистические методы в сельхозмашиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 360 с.
7. **Коробейников А. Т., Лихачев В. С., Шолохов В. Ф.** Испытания сельскохозяйственных тракторов. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
8. **Джонсон Н., Лион Ф.** Статистика и планирование эксперимента в науке и технике: Методы планирования эксперимента: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 520 с.
9. **Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф.** Планирование эксперимента. Минск: БГУ, 1982. 302 с.
10. **Ящерицын П. И., Махаринский Е. И.** Планирование эксперимента в машиностроении. Минск: Высш. шк., 1985. 286 с.