

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_5

УДК 621.51

А. С. Галюжин

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ ОСУШКИ СЖАТОГО ВОЗДУХА ПНЕВМОСИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

A. S. Haluzhin

A METHOD FOR INCREASING THE DEGREE OF COMPRESSED AIR DRYING IN PNEUMATIC SYSTEMS OF MOBILE MACHINES

Аннотация

Проанализированы способы осушки сжатого воздуха пневмосистем мобильных машин, определены достоинства и недостатки этих способов. На основе данного анализа и базируясь на основных положениях теоретической механики, теории магнитного поля и молекулярной физики, обоснован способ магнитно-центробежной осушки сжатого воздуха. Экспериментальные исследования, проведенные на макетном образце, показали достаточно высокую эффективность этого способа, т. к. удалось достичь 3-го класса чистоты по ISO 8573-1:2001.

Ключевые слова:

пневмопривод, конденсат, осушка воздуха, силовое воздействие, влагоотделитель, магнитное поле, магнитно-центробежный способ.

Для цитирования:

Галюжин, А. С. Способ повышения степени осушки сжатого воздуха пневмосистем мобильных машин / А. С. Галюжин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 5–13.

Abstract

The article analyzes methods for drying compressed air in pneumatic systems of mobile machines determining the advantages and disadvantages of these methods. Based on this analysis and the main provisions of theoretical mechanics, magnetic field theory and molecular physics, a method for magnetic centrifugal drying of compressed air is substantiated. Experimental studies carried out on a prototype proved a fairly high level of efficiency of this method as air cleanness of ISO 8573-1:2001 class 3 was reached.

Keywords:

pneumatic drive, condensed air, air drying, force impact, moisture separator, magnetic field, magnetic centrifugal method.

For citation:

Haluzhin, A. S. A method for increasing the degree of compressed air drying in pneumatic systems of mobile machines / A. S. Haluzhin // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 5–13.

При эксплуатации пневмосистем в холодный период года существует проблема замерзания конденсата в устройствах и трубопроводах, в результате чего происходит отказ пневмосистемы.

Кроме того, конденсат может попадать в пневмоприводы оборудования и приспособлений, приводить к коррозии и, соответственно, к повышенному износу подвижных элементов. При сжатии

влажного атмосферного воздуха происходит уменьшение его объема, но количество паров воды при этом не меняется. В результате количество паров в единице объема сжатого воздуха растет практически пропорционально степени сжатия воздуха, зачастую сжатый воздух становится пересыщенным и образуется конденсат. Кроме того, в сжатом воздухе состояние насыщения наступает при более высокой температуре, что также увеличивает количество конденсата [1]. Очевидно, что для исключения данных явлений необходимо удалить из сжатого воздуха не только конденсат, но и часть паров воды.

Расчетно-теоретические исследования проводились с использованием программного пакета Mathcad. При проведении экспериментальных исследований использовались датчики влажности НН-4602-С, плата сбора данных National Instruments NI 6009 и компьютер. В программе Labview 2011, которая поставляется вместе с платой, была реализована схема, позволяющая подключить датчики НН-4602-С и производить обработку поступающей информации с данных датчиков.

В настоящее время удаление влаги из воздуха чаще всего осуществляют за счет *конденсации, сорбции, диффузии и путем силового воздействия на частицы воды* [2–4]. Рассмотрим недостатки и преимущества этих способов.

Конденсация осуществляется путем перевода воды из парообразной фазы в жидкую, затем сконденсированная вода собирается в конденсатоприемнике и удаляется в дренаж. Известно, что состояние насыщения влажного воздуха зависит от давления или температуры. При сжатии влажного воздуха происходит повышение давления и, соответственно, уменьшение его объема, но количество парообразной воды при неизменной температуре в воздухе остается неизменным. В этом случае удельное содержание паров воды увеличивается, наступает состояние пересыщения и об-

разуется конденсат, который удаляется, а воздух путем снижения давления становится достаточно сухим. Такой способ осушения воздуха называют *пересжатием*. При использовании данного способа не нужны дополнительные устройства (осушители, влагоотделители и т. д.), что можно отнести к достоинствам. Однако при этом необходимо применение воздушного насоса более высокого давления. Вместе с тем стоимость такой пневмосистемы увеличивается, а также растет расход энергии на привод такого насоса.

Также известно, что при снижении температуры влажного воздуха количество водяного пара в нем в состоянии насыщения снижается. Поэтому при уменьшении температуры сжатого воздуха ниже температуры точки росы происходит образование конденсата. Это свойство влажного воздуха положено в основу осушки воздуха путем его *переохлаждения*. В этом случае с помощью охладителя снижают температуру сжатого воздуха, собирают и удаляют образовавшийся конденсат. Следует отметить, что в соответствии с известным явлением, установленным Клапейроном, при охлаждении сжатого воздуха при неизменном объеме уменьшается его давление. Поэтому такой способ в пневмосистемах мобильных машин не применяется, а в системах вентиляции и устройствах для удаления паров воды из природного газа используется достаточно широко. К недостаткам этого способа относится необходимость установки дополнительного охладителя воздуха, что приводит к значительному увеличению расхода энергии [5, 6].

В пневмосистемах современных мобильных машин чаще всего используется осушка воздуха *сорбцией* (от лат. *sorbeo* – поглощаю), т. е. с помощью специальных веществ (сорбентов) поглощается влага, которая находится в воздухе. Известны три вида сорбции: *адсорбция, абсорбция и хемосорбция*.

Сущность *адсорбции* (от лат. *ad* – на, при; *sorbeo* – поглощаю) заключается в использовании сил межмолекулярного взаимодействия поверхностных молекул адсорбента с молекулами воды. При этом происходит сцепление этих молекул. Увеличение поверхности взаимодействия адсорбента обеспечивают путем его гранулирования и обеспечения пористости. На поверхности адсорбента происходит только удержание молекул воды без химических реакций. В качестве адсорбентов применяются различные вещества: активированный уголь, силикагели, цеолиты, алюмогели и др.

Сущность *абсорбции* (от лат. *absorptio, absorbere* – поглощать) заключается в способности некоторых жидких веществ поглощать парообразные вещества. Например, серная кислота успешно поглощает пары воды. Абсорбция применяется при осушке природного газа, в пневмосистемах применения она не нашла [7]. При *хемосорбции* (химической сорбции) также происходит поглощение паров воды, но при этом образуются новые химические соединения. Этот способ в пневмоприводах также не нашел применения.

Способ *мембранной диффузии* основан на способности проникать через мембрану одних молекул, а оставшихся задерживаться, имея различный размер. Самые большие по поперечному размеру – молекулы азота (0,38 нм). Молекулы кислорода и воды несколько меньше и составляют 0,36 и 0,3 нм соответственно. Остальные молекулы газов, входящих в состав воздуха, не рассматриваются из-за незначительного их количества. Мембранный осушитель воздуха состоит из множества полых внутри полимерных волокон. Внутренняя поверхность этих волокон имеет слой еще одного полимера, который способен пропускать только молекулы воды. Молекулы кислорода и азота движутся внутри мембранных волокон, а молекулы воды проходят через слоистую стенку наружу. Таким образом, происходит

отделение молекул воды. При этом некоторая часть осушенного воздуха направляется на продувку наружной поверхности волокон для удаления молекул воды в атмосферу. Конденсат в этом случае не образуется, что снимает проблему его отвода. В целом, эффективность таких осушителей достаточно высокая, но они требуют предварительной очистки воздуха от пыли и масла. В противном случае происходит быстрое замасливание и засорение полых волокон, и эффективность мембранного осушителя вскоре снижается.

Осушка сжатого воздуха от частиц воды путем использования центробежной силы (*силовое воздействие*) достаточно широко используется в пневмоприводах мобильных машин. В центробежных влагоотделителях поток воздуха движется по криволинейной траектории, а на частицы воды действует центробежная сила, которая отбрасывает частицы воды к стенкам корпуса. Собравшийся на стенках конденсат стекает во влагосорбник, а затем в дренаж. К недостаткам центробежных влагоотделителей относится возможность удаления только капель, а водяной пар остается в воздухе. Если происходит дальнейшее охлаждение сжатого воздуха, то в нем снова образуется конденсат.

В стационарных системах осушки воздуха используют силовой способ, основанный на применении силы Кулона. При нахождении электрически заряженной частицы в электростатическом поле на эту частицу действует сила Кулона. Однако при этом необходимо обеспечить напряжённость электростатического поля в несколько десятков киловольт на метр. Повышенные требования по электробезопасности такого устройства приводят к его усложнению и, соответственно, удорожанию. Поэтому этот способ, основанный на использовании электростатических сил, в пневмосистемах не используется.

Рассмотрим возможные способы повышения эффективности работы цен-

тробежного влагоотделителя, который прост по конструкции и требует регулярной замены адсорбента. В пневмоприводах мобильных машин в 60–70-е гг. прошлого столетия в основном использовались центробежные влагоотделители. В них поток воздуха двигался по нисходящей спиральной траектории. При этом возникала центробежная сила $F_{ц}$, под действием которой частицы воды отбрасывались к вертикальным стенкам корпуса влагоотделителя. Собранный на стенках конденсат стекал вниз в конденсатоприемник, а затем при цикловом отключении компрессора выбрасывался в

окружающую среду путем продувки влагоотделителя сжатым воздухом из специального ресивера. Сила $F_{ц}$, действующая на частицу воды, рассчитывается по известной зависимости (рис. 1) [8]

$$F_{ц} = \frac{mV_0^2}{r}, \quad (1)$$

где m , V_0 – масса и переносная (окружная) скорость частицы воды, кг и м/с, соответственно; r – радиус криволинейной траектории, м.

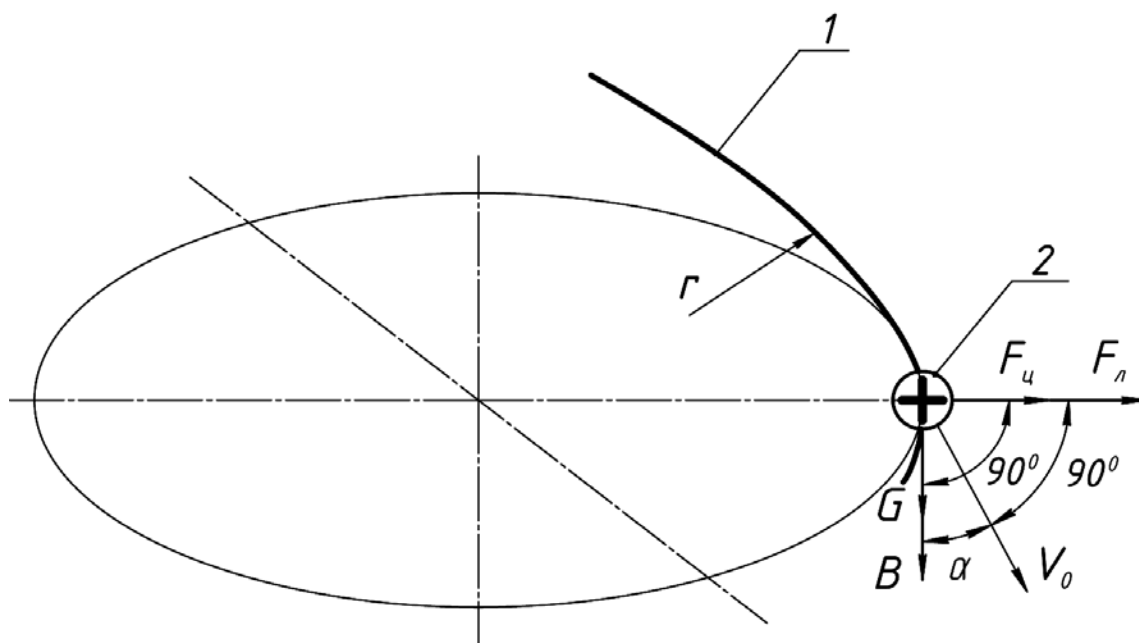


Рис. 1. Силовое воздействие на частицу 2, имеющую электрический заряд и движущуюся со скоростью V_0 в магнитном поле по спиральной траектории 1

Зависимость (1) показывает, что повысить степень осушки сжатого воздуха можно за счет увеличения $F_{ц}$. В этом случае меньшие по массе частицы воды будут достигать стенок корпуса. Эту задачу можно решить, увеличивая V_0 или уменьшая r . Рост V_0 приводит к увеличению газодинамических потерь энергии на внутреннее трение в сжатом воздухе, которые, как известно, пропорциональны V_0^2 . Уменьшение r приводит к росту потерь в местных со-

противлениях, что также приводит к увеличению газодинамических потерь. Проведенные экспериментальные исследования показали, что увеличить $F_{ц}$ в центробежных влагоотделителях, используемых в пневмосистемах, путем изменения V_0 и r можно всего на 10 %...14 % [9].

Значительно увеличить силу, которая воздействует на частицу воды в направлении от центра к стенке корпуса, можно путем прибавления силы Лоренца

к центробежной силе. Это достигается при движении электрически заряженной частицы воды в магнитном поле. Когда заряженная частица 2 (см. рис. 1), имеющая электрический заряд q , движется в магнитном поле со скоростью V_0 по спиральной траектории 1, то на нее действует сила Лоренца F_l (см. рис. 1). Для определения данной силы используют известную зависимость [10]

$$\vec{F}_l = q [\vec{V}_0, \vec{B}], \quad (2)$$

где B – магнитная индукция, Тл.
Абсолютная величина силы

$$F_l = q V_0 B \sin \alpha, \quad (3)$$

где α – угол, образуемый векторами V_0 и B , град.

Таким образом, для использования данного физического закона необходимо электрически зарядить частицу воды и создать в центробежном влагоотделителе магнитное поле, при котором силы F_c и F_l будут совпадать по направлению. Это позволит значительно увеличить общую силу, действующую на частицу воды в радиальном направлении [11].

Разработанный способ осушки сжатого воздуха основан на использовании вышеупомянутого закона физики. Перед подачей сжатого воздуха в центробежный влагоотделитель производится придание частицам воды электрического заряда. С помощью соленоида создается такое магнитное поле, чтобы центробежная сила и сила Лоренца совпадали по направлению (рис. 2).

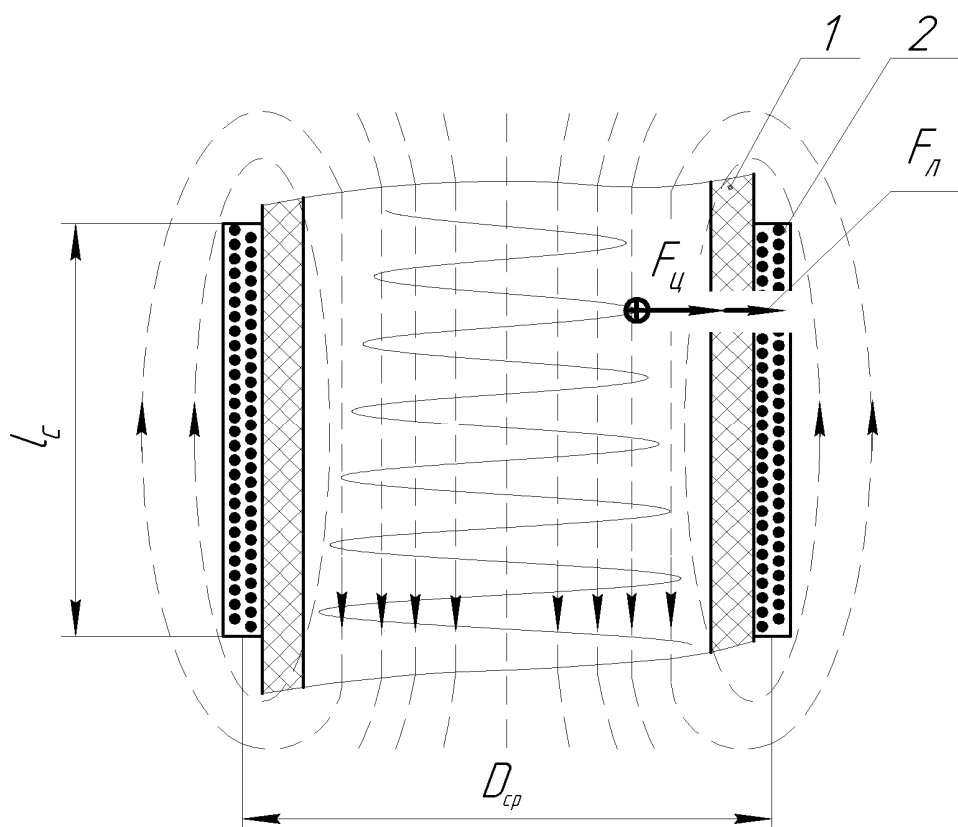


Рис. 2. Схема расположения соленоида для создания во влагоотделителе магнитного поля: 1 – корпус; 2 – соленоид; 3 – магнитное поле; 4 – траектория движения частицы воды

При этом индукция магнитного поля внутри соленоида рассчитывается с помощью известного выражения [11]

$$B = \mu \mu_0 \frac{I w}{\sqrt{l_c^2 + D_{cp}^2}}, \quad (4)$$

где I – сила тока в обмотке соленоида, А; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А²; μ – магнитная проницаемость среды для воздуха и материалов парамагнитного типа, $\mu \approx 1$; w – число витков обмотки соленоида, шт.; l_c , D_{cp} – длина и средний диаметр обмотки соленоида соответственно, м.

Эффективная работа влагоотделителя возможна в том случае, когда направление и модуль магнитной индукции B неизменны во времени. Данное требование реализуемо в том случае, когда ток I , протекающий по обмотке соленоида, является постоянным, что возможно при протекании по обмотке соленоида постоянного тока: $I = U/R$, где U – напряжение, питающее обмотку соленоида; R – активная часть сопротивления обмотки соленоида, Ом.

Для определения величины R используется известная зависимость

$$R = \rho_{np} \frac{l}{S_{np}}, \quad (5)$$

где ρ_{np} – удельное сопротивление проводника обмотки, Ом·м; l , S_{np} – длина и площадь поперечного сечения проводника, м и м², соответственно.

Тогда сила тока будет определена следующим образом:

$$I = \frac{U S_{np}}{\rho_{np} l}. \quad (6)$$

С учетом (6) зависимость (4) примет вид

$$B = \mu \mu_0 \frac{U S_{np} w}{\rho_{np} l \sqrt{l_c^2 + D_{cp}^2}}. \quad (7)$$

С учетом того, что $w = \frac{l}{\pi D_{cp}}$,

получим

$$B = \mu \mu_0 \frac{U S_{np}}{\pi D_{cp} \rho_{np} \sqrt{l_c^2 + D_{cp}^2}}. \quad (8)$$

Величины D_{cp} и l всегда ограничены габаритами конструкции влагоотделителя, а численные значения μ и ρ для материала обмотки и материала корпуса влагоотделителя являются величинами неизменными. Поэтому наибольшее значение магнитной индукции B можно обеспечить за счет увеличения значений U и S_{np} .

Подставим в (3) B из зависимости (8) и получим уравнение для вычисления силы F_l , которая действует на электрически заряженную частицу воды, движущуюся по спиральной траектории в соленоиде,

$$F_l = q V_o \sin \alpha \mu \mu_0 \frac{U S_{np}}{\pi D_{cp} \rho_{np} \sqrt{l_c^2 + D_{cp}^2}}. \quad (9)$$

Как отмечалось ранее, перед входением частицы воды в магнитное поле ей необходимо придать электрический заряд, что можно осуществить с помощью ионизирующего излучения.

Энергия E , необходимая для ионизации молекул воды, определена как $E = 12,58 \dots 12,621$ эВ $\approx 2 \cdot 10^{-18}$ Дж [13–15]. В качестве ионизирующего излучения можно использовать электромагнитное излучение (ЭМИ), длина волны которого

$$\lambda = \frac{h c}{E}, \quad (10)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с [16]; c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с [16].

Для определения соответствующей длины волны ЭМИ подставим значения h , c и E в (10). Тогда $\lambda = 9,94 \cdot 10^{-8}$ м – это длина волны ультрафиолетового излучения [17]. Это означает, что молекулы воды можно облучать различными ультрафиолетовыми приборами.

Вместе с тем сжатый воздух более чем на 99 % состоит из молекул азота N_2 и кислорода O_2 . Остальные газы не учитываем из-за их незначительного содержания. Энергия ионизации молекул N_2 равна 15,6 эВ, а O_2 – 12,1 эВ [13], т. е. эти энергии близки к энергии ионизации молекул H_2O . Поэтому для облучения потока сжатого воздуха необходимо выбирать источники ультрафиолетового излучения с длиной волны, соответствующей $\lambda \approx 10 \cdot 10^{-8}$ м. В этом случае можно избежать ионизации молекул N_2 и O_2 .

Известно, что массы молекул H_2O , O_2 и N_2 различны и составляют $2,993 \cdot 10^{-26}$; $5,315 \cdot 10^{-26}$ и $4,651 \cdot 10^{-26}$ кг соответственно [14, 15]. Поэтому при движении данных молекул по спиральной траектории во влагоотделителе наибольшая $F_{ц}$ будет воздействовать на молекулу O_2 . Вместе с тем молекула H_2O представляет собой диполь, что связано со строением ее электронных оболочек, которые содержат пять пар электронов. Первая пара находится около ядра атома кислорода, вторая и третья пары образуют ковалентные связи O–H, оставшиеся четвертая и пятая пары относятся к неподеленным парам [18]. Из-за присутствия дипольного момента у молекул H_2O взаимодействие между ними является достаточно сильным и называется водородной связью. Поэтому во влажном воздухе чаще всего образуются димеры, тримеры и полимеры воды, т. е. $(H_2O)_2$, $(H_2O)_3$ и $(H_2O)_n$ (рис. 3) [19].

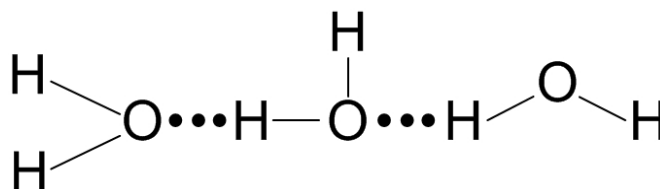


Рис. 3. Схема частицы воды (тримера): ... – обозначение водородной связи

В дальнейшем назовем данные образования следующим термином – «частицы воды». В этом случае $F_{ц}$ будет пропорциональна числу молекул в частице воды и больше $F_{ц}$, действующих на молекулы O_2 и N_2 . Поэтому при движении сжатого воздуха по спиральной линии наиболее удаленными от центра влагоотделителя будут частицы воды. Это означает, что ультрафиолетовый облучатель необходимо устанавливать в точке, наиболее удаленной от оси влагоотделителя. Как показали экспериментальные исследования, облучать поток сжатого воздуха необходимо после

прохождения им 1,8–2 витков спиральной канавки после входа во влагоотделитель. При этом примерно через два витка наибольшая концентрация частиц воды будет в районе облучателя, что повысит эффективность ионизации.

В магнитном поле соленоида положительные ионы и электроны будут двигаться в противоположных друг другу направлениях.

Под действием $F_{ц}$ и $F_{л}$ частицы воды с положительным зарядом будут попадать на внутреннюю стенку корпуса, которая уже до облучения будет покрыта тонким слоем конденсата. Благо-

даря водородным связям эти частицы воды будут сцепляться с молекулами воды слоя конденсата на внутренней стенке корпуса.

Известно, что наибольшим сродством к электрону обладает кислород (1,47 эВ). Для азота данная величина отрицательна и равна $-0,21$ эВ [20]. Это означает, что движущиеся к оси влагоотделителя электроны в основном будут захватывать электрически нейтральные молекулы O_2 . Это явление применено А. Л. Чижевским при разработке ионизаторов воздуха, названных в честь автора «люстрами Чижевского» [21]. Количество молекул O_2 в потоке влажного воздуха значительно превышает количество частиц воды, поэтому проблема удаления свободных электронов не возникает.

Произведем анализ эффективности применения этого способа. Рассмотрим димер воды с одним выбитым электроном. При этом масса димера будет $m = 5,986 \cdot 10^{-26}$ кг [16], а положительный заряд $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл [16]. Исходя из реальной конструкции небольшой пневмосистемы (например, троллейбуса) с компрессором ЭК 4В-М примем радиус движения димера $r = 63$ мм. Для обеспечения безопасности труда запитаем соленоид напряжением $U = 24$ В. При таком напряжении и использовании медного провода для обмотки с $S_{np} = 3,92 \cdot 10^{-6}$ м² и при $l_c = 130$ мм можно достичь $B = 0,018$ Тл. Подача сжатого воздуха $Q_k = 5 \cdot 10^{-3}$ м³/с, площадь сечения спирального канала влагоотделителя $S_{ок} = 0,113 \cdot 10^{-3}$ м², а угол подъема спиральной линии $\gamma = 6^\circ$. Площадь сечения спирального канала принята из условия равенства площади сечения трубопровода, соединяющегося с влагоотделителем. Угол $\gamma = 6^\circ$ в среднем соответствует известным центробежным влагоотделителям пневмоприводов стационарных машин. Используя такие

исходные данные, с помощью уравнений (1) и (9) определим соотношение $F_l / F_c = 70,02$. Таким образом, даже при одном выбитом электроне сила Лоренца будет примерно в 70 раз больше центробежной силы, действующей на ионизированную частицу воды.

Экспериментальные исследования, проведенные на макетном образце, показали, что вышерассмотренный магнитно-центробежный способ осушки сжатого воздуха пневмосистем мобильных машин позволяет существенно обеспечить высокую степень осушки сжатого воздуха пневмосистемы и достичь 3-го класса чистоты по ISO 8573-1:2001 [22]. Расходы энергии для питания катушки соленоида незначительны. Важным достоинством является отсутствие расходных материалов (адсорбентов). Также степень осушки в течение всего срока эксплуатации влагоотделителя остается практически неизменной.

Магнитно-центробежный способ позволяет достичь высокой степени осушки сжатого воздуха, т. к. суммарная сила, воздействующая на частицу воды, почти на два порядка превышает центробежную силу. В результате стендовых экспериментальных исследований пневмосистемы с компрессором ЭК 4В-М и магнитно-центробежным влагоотделителем установлено, что на выходе влагоотделителя сжатый воздух примерно соответствует 3-му классу чистоты по ISO 8573-1:2001. При использовании только центробежного влагоотделителя сжатый воздух на его выходе находится в состоянии насыщения и при дальнейшем охлаждении в нем образуется конденсат, который, поступая в элементы пневмопривода, приводит к их коррозии и быстрому износу, а в условиях отрицательных температур данный конденсат замерзает и наблюдается отказ пневмопривода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 24484–80.** Промышленная чистота. Сжатый воздух. Методы измерения загрязненности. Москва: Изд-во стандартов, 1980. – 9 с.
2. **Totay, A.** Magnetic-centrifugal drying of compressed air of pneumatic systems of machine-building enterprises / A. Totay, S. Galyuzhin, A. Galyuzhin // Journal of Physics: Conference Series, Mathematical modeling and computational methods in problems of hydro-aerodynamics, magnetohydrodynamics, plasma physics and astrophysics Citation Published under licence by IOP Publishing Ltd. – 2021. – Vol. 2131.
3. **Галюжин, А. С.** Повышение безопасности пневмоприводов путем увеличения степени осушки сжатого воздуха / А. С. Галюжин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2 (51). – С. 6–13.
4. **Wee Horng Tay.** Procedia Engineering / Wee Horng Tay, Kok Keong Lau, Dr Azmi Mohd Shariff. – 2016. – № 148. – С. 1096–1103.
5. Способ дегидратации газа: пат. RU 2119376 / Р. Д. Эрроусмит, К. Джонс. – Опубл. 27.09.1998.
6. Система осушки сжатого воздуха (С-ОСВ) на базе бесфреоновых осушителей ОСВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cvert.ru/1.1.htm>. – Дата доступа: 10.05.2023.
7. **Жданова, Н. В.** Осушка углеводородных газов / Н. В. Жданова, А. В. Халиф. – Москва: Химия, 1984. – 192 с.
8. **Бутенин, Н. В.** Курс теоретической механики: учебное пособие: в 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – Санкт-Петербург: Лань, 1998. – Т. 1. – 736 с.
9. **Галюжин, А. С.** Осушка сжатого воздуха с помощью магнитного поля / А. С. Галюжин // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 126–134.
10. **Арцимович, Л. А.** Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях / Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов. – Москва: Наука, 1978. – 224 с.
11. **Инкин, А. И.** Электромагнитные поля и параметры электрических машин: учебное пособие / А. И. Инкин. – Новосибирск: ЮКЭА, 2002. – 464 с.
12. **Шелихов, Г. С.** Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов / Г. С. Шелихов. – Москва: Эксперт, 1995. – 224 с.
13. **Радциг, А. А.** Справочник по атомной и молекулярной физике / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – Москва: Атомиздат, 1980. – 240 с.
14. **Mallard, W. G.** NIST Chemistry Webbook. NIST Standard Reference Database / W. G. Mallard, P. Linstrom. – Gaithersburg : Nat. Standards and Technol., 2000. – № 69.
15. **Завилопуло, А. Н.** Ионизация молекул азота, кислорода, воды и двуокиси углерода электронным ударом вблизи порога / А. Г. Завилопуло, Ф. Ф. Чипев, О. Б. Шпеник // Журн. техн. физики. – 2005. – Т. 75, вып. 4. – С. 19–24.
16. **Радциг, А. А.** Параметры атомов и атомных ионов: справочник / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.
17. **Трофимова, Т. Н.** Курс физики: учебник / Т. Н. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 1985. – 432 с.
18. **Леше, К.** Физика молекул: пер. с нем. / К. Леше. – Москва: Мир, 1987. – 232 с.
19. **Глинка, Н. Л.** Общая химия : учебное пособие / Н. Л. Глинка; под ред. В. А. Рабиновича. – Ленинград: Химия, 1983. – 704 с.
20. **Гороновский, И. Т.** Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаченко, Е. Ф. Некряч. – Киев: Наукова думка, 1987. – 829 с.
21. **Чижевский, А. Л.** Аэроионификация в народном хозяйстве / А. Л. Чижевский. – Москва: Книга по Требованию, 2012. – 487 с.
22. **ISO 8573-1:2001.** Compressed air. Part 1: Contaminants and purity classes. International Organization for Standardization. – 8 p.

Статья сдана в редакцию 28 апреля 2023 года

Александр Сергеевич Галюжин, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Alexander Sergeevich Haluzhin, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University.