

10. Bakhvalov N.S. Chislennyye metody [Numerical methods]. Moskva: Nauka [Science], 2003. 455 p.

11. Godunov S.K., Ryaben'kiy V.S. Raznostnye skhemy [Difference schemes]. M.: Nauka [Science], 1993. 400 p.

12. Moore R.E. Interval analysis. N.Y., Prentice Hall, 1996. 545 p.

13. Shokin Yu.I., Kalmykov S.A. On interval-analytical method of sweep (Freiburger Intervall-Berichte). 1980. № 80/10.

14. Shokin Yu.I., Kalmykov S.A. On the interval-analytical method for ordinary differential equations (Freiburger Intervall-Berichte). 1982. № 82/5.

Yuri A. Sudnik – PhD (Eng) – Higher Doctorate, Professor, Head of “Automation and Robotization of Technological Processes” Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; phone: +7-926-334-89-76; e-mail: energo-yaz@mail.ru.

Sergey A. Andreyev – PhD (Eng), Associate Professor, Professor of “Automation and Robotization of Technological Processes” Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; phone: +7-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Received on December 21, 2015

УДК 631.3:628.8/9

С.А. АНДРЕЕВ, В.И. ЗАГИНАЙЛОВ, П.Л. МЕЩАНИНОВА

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ СИЛИКАГЕЛЯ В АДсорбЦИОННЫХ ОСУШИТЕЛЯХ ВОЗДУХА

Влажность воздуха оказывает значительное влияние на эффективность многих сельскохозяйственных технологических процессов. Вместе с тем поддержание влажности воздуха в заданных пределах является непростой инженерной задачей из-за несовершенства современных осушителей, их высокой стоимости и большой энергоёмкости. Целью исследований явилось совершенствование конструкций адсорбционных осушителей посредством изменения режима регенерации силикагеля. Основным отличием разработанных осушителей стала замена используемого в зоне регенерации горячего воздуха на воздух с комнатной температурой, содержащий озон в концентрации 10...50 мг/м³. Установлено, что использование озона существенно интенсифицирует процесс регенерации силикагеля, не влияет на технологический процесс и не наносит ущерба окружающей среде. Предложено несколько гипотез, объясняющих механизм интенсифицирующего действия озона. Среди них – гипотеза, связанная с образованием активных центров влаги в газовой фазе и формировании влажностного напора на среде воздух-силикагель, гипотеза об изменении поверхностного натяжения влаги, содержащейся в силикагеле, и гипотеза, основанная на изменении электрических свойств поверхности силикагеля. Приведено описание адсорбционного осушителя воздуха с регенерацией силикагеля в озono-воздушной среде.

Ключевые слова: осушение воздуха, адсорбция, регенерации силикагеля, озон, энергозатраты.

Прогрессивным способом повышения эффективности работы водогрейных котлов может стать горение газа в озono-воздушной среде. Известно, что озonoвый наддув снижает затраты газа на 15...20% и улучшает химический состав продуктов сгорания. Озон является нестойким веществом, и его невозможно запастись заблаговременно, поэтому получение озона должно производиться непосред-

ственно в котлах. Для получения озона требуется энергия, и эту энергию необходимо учитывать.

В статье рассмотрены химические реакции горения компонентов природного газа в кислороде и определено необходимое количество кислорода для котлов с тепловой мощностью 7...30 кВт. Высокие окислительные свойства озона, а также некоторые другие его особенности потребовали для горения

газа 3,5 г озона на каждый час работы котла. На основе анализа современных методов получения озона был сделан вывод о целесообразности использования барьерного электрического разряда. Этот метод является производительным и экологически чистым. Для создания озono-воздушной среды с требуемой концентрацией озона озонатор должен обладать мощностью порядка 100 Вт, составляющей примерно 0,33...1,5% от тепловой мощности котлов. Это свидетельствует о целесообразности озono-воздушного наддува в топочные камеры.

Эффективность многих сельскохозяйственных технологических процессов в значительной мере зависит от точного поддержания влажности окружающей среды. К ним относятся процессы животноводства, птицеводства, растениеводства защищенного грунта, хранения сельскохозяйственной продукции и ряд других. Отклонение влажности воздуха обычно влечет за собой снижение производительности, ухудшение качества продукции и увеличение эксплуатационных затрат [1].

Управление влажностью предполагает разнополярное целенаправленное воздействие на объект. В одних случаях влажность воздуха надо увеличивать (увлажнять), в других – уменьшать (осушать). Первая из указанных задач решается относительно просто. Сегодня промышленность выпускает целый ряд надежных изотермических и адиабатных увлажнителей [2, 3]. А вот вторая задача, несмотря на свою давнюю историю, до сих пор окончательно не решена. К сожалению, осушение воздуха часто сопровождается изменением его температуры или газового состава, что не всегда удовлетворяет требования технологического процесса. Но самое главное – процесс осушения воздуха остается весьма энергоемким. Например, при использовании ассимиляционного способа осушения воздуха на каждый литр испаряемой влаги затрачивается 0,67 кВт·ч тепловой энергии.

Наибольшее распространение сегодня получили адсорбционные осушители [4]. В этих устройствах осушаемый воздух пропускается через слой влагопоглощающего сухого вещества – сорбента. В качестве сорбента обычно используется силикагель-высушенный гель, образующийся из перенасыщенных растворов кремниевых кислот: ($n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$) при $\text{pH} > 5 \dots 6$. Главной особенностью силикагеля является его высокая способность к впитыванию влаги из воздуха за счет пористости структуры. Силикагель характеризуется огромной площадью поверхности ($800 \text{ м}^2/1 \text{ г}$), состоящей из групп $-\text{SiOH}$, которые расположены на расстоянии 0,5 нм друг от друга. Силикагель впитывает влагу из воздуха, а затем, и по мере осушения (регенерации), снова отдает ее внешней среде. Для использования этого эффекта поглощение и выделение влаги должны производиться в разных местах. С целью обеспечения непрерывности процесса емкость с силикагелем приводят в медленное вращательное движение. При этом силикагель периодически попадает в зону осушения воздуха и в зону регенерации.

К сожалению, затраты тепловой энергии на регенерацию силикагеля остаются весьма значительными. Известно, что для удаления 5,5 кг влаги за 1 ч мощность современного адсорбционного осушителя должна составлять примерно 15 кВт. Следовательно, в пересчете на 1 кг удаляемой влаги энергозатраты окажутся на уровне 2,7 кВт·ч [5, 6].

Снизить энергозатраты на регенерацию силикагеля оказалось возможным за счет уменьшения температуры воздуха в зоне регенерации с одновременным добавлением в него озона. Установлено, что озono-воздушная смесь при концентрации озона в пределах $10 \dots 50 \text{ мг/м}^3$ способна интенсифицировать регенерацию силикагеля примерно на 15...20% [7]. Поскольку озон является крайне неустойчивым веществом, его невозможно производить заблаговременно и использовать по мере необходимости. Поэтому в установках для осушения воздуха получение озона должно осуществляться непосредственно перед его подачей в зону регенерации [8]. Из известных методов получения озона в таких установках эффективно использовать барьерный разряд, электролиз, фотохимический способ и высокочастотное электрическое поле. В практической деятельности наиболее часто синтез озона осуществляют в барьерном разряде [9].

Современная промышленность серийно выпускает широкий ряд разнообразных озонаторов. Для создания требуемой концентрации озона в составе озono-воздушной смеси можно использовать, например, промышленные озонаторы типа ZY-K7, Озон 60-П, Озон 90-П и им подобные с производительностью от 7 г/ч до 70 г/ч и мощностью от 90 Вт до 500 Вт.

На сегодняшний день единое объяснение интенсифицирующего влияния озона на регенерацию силикагеля, к сожалению, не сложилось. Тем не менее были сформулированы несколько соответствующих гипотез, суть которых изложена ниже. Формулируя эти гипотезы, мы допускали возможность одновременного действия нескольких перечисленных механизмов. При этом в зависимости от текущих условий доминирующее значение может переходить от одного из них к другому.

В соответствии с первой, наиболее простой гипотезой, интенсификация осушения объясняется изменением состояния воздушной среды, окружающей силикагель. Озон, содержащийся в этой среде, способствует образованию активных центров в газовой фазе. В этих центрах происходит конденсация влаги. При этом молекулы воды объединяются в микрокапли, вокруг которых происходит локальная концентрация влаги. Эффективная концентрация воды в воздухе снижается, а влажностный напор на границе осушаемого силикагеля и воздушной среды возрастает. Повышенный градиент влажности способствует ускорению перемещения влаги из внешних слоев силикагеля, превращению ее в газообразное состояние и в конечном итоге – интенсификации осушения силикагеля.

По второй гипотезе интенсифицирующее действие озона связано с изменением энергетических свойств поверхностного слоя испаряющейся влаги. Эта гипотеза имеет скорее химическую природу. Для пояснения сущности гипотезы вспомним любопытный пример из биологии. Известно, что некоторые насекомые (например, водомерки, пукирыболовы, комары), имеющие небольшую массу, обладают способностью легко располагаться на поверхности воды и свободно по ней перемещаться. Интересно, что средняя плотность тел этих насекомых остается выше плотности воды. И тем не менее они не тонут и могут длительно время, без усилий, неподвижно находиться на поверхности. Этот эффект объясняется поверхностным натяжением – явлением, хорошо изученным и описанным в теории физической химии. Однако если в воду, на поверхности которой находятся насекомые, добавить небольшое количество какого-нибудь поверхностно активного вещества (например, мыла), то поверхностное натяжение воды существенно уменьшится, и насекомые будут тонуть. Известно, что поверхностно-активное вещество может быть жидким, твердым или газообразным.

Таким образом, озон, оказываясь в окрестности осушаемого силикагеля, выполняет роль такого же поверхностно-активного вещества. Являясь химически неустойчивым активным компонентом, озон либо вступает в химические реакции со влагой на поверхности силикагеля, либо адсорбируется и забирает некоторую ее энергию. Эта энергия необходима озону для перехода в более устойчивую (молекулярную) форму. В то же время энергия поверхностного слоя воды, сосредоточенной в силикагеле, уменьшается. Это приводит к повышению вероятности преодоления силы поверхностного натяжения отдельными молекулами и «упрощает» процесс испарения. Другими словами, для преодоления энергетического барьера молекулам воды требуется меньшая энергия, следовательно, процесс выделения влаги из силикагеля пойдет более интенсивно.

Разумеется, с целью уменьшения поверхностного натяжения воды, помимо озона, может быть успешно использовано и какое-нибудь иное вещество. Это вещество может быть газообразным, жидким или даже твердым. Однако с технологической точки зрения наиболее привлекательным является именно озон. К наиболее существенным преимуществам озона в первую очередь можно отнести:

- несложность и дешевизну получения;
- отсутствие отрицательных экологических последствий от использования;
- безопасность применения для обслуживающего персонала при соблюдении элементарных санитарных требований;
- быстрый (в течение десятков секунд) самораспад озона в составе озono-воздушной смеси, прошедшей стадию регенерацию силикагеля;
- высокую равномерность воздействия;

– отсутствие влияние на основной технологический процесс, осуществляемый в осушаемом помещении.

Следующая гипотеза основана на физическом эффекте, заключающемся в изменении свойств воздуха при его ионизации воздействием электрической природы. Известно, что ионизированные молекулы воздуха способны изменять электрические свойства поверхностей. Около 100 лет назад было обнаружено, что на поверхности клетки растительного или животного происхождения имеется двойной подвижный электрический слой. Этот слой образуется ионами противоположных знаков. Ионы одного знака располагаются внутри пленки, ионы противоположного – на ее поверхности. Интересно, что этот поверхностный слой может быть образован ионами одного знака, но при разной концентрации (как однополярный переменный ток, образующийся в результате двухполупериодного выпрямления). Например, хорошо изучен процесс проникновения ионов натрия в клетку и уход из нее. Этот процесс меняет напряжение электрического слоя и может привести к запираанию диффузии через клеточную мембрану. А диффузия, в свою очередь, либо предотвращает проникновение вещества вовнутрь, либо препятствует его выходу наружу.

Из вышесказанного можно сделать вывод о разноточности эффекта использования озона в качестве интенсифицирующего вещества при регенерации силикагеля. Доказательством справедливости этой гипотезы является экстремальный характер зависимости интенсивности сушки твердых веществ от концентрации озона.

Своеобразие структуры силикагеля определяет большую вероятность именно физической гипотезы сушки. Дело в том, что силикагель – это коллоидный раствор поликремниевых кислот. Элементы кремниевых кислот находятся в высших степенях окисления, поэтому вероятность химических процессов окисления озном крайне низка. Небольшая вероятность приходится на химические процессы, происходящие за счет примесей или инородных элементов. Однако в классическом силикагеле доля таких примесей очень мала. Поэтому эффекты запираания или ускорения движения заряженных молекул, проявляющиеся в замедлении или ускорении сушки, можно рассматривать как следствие явлений физической природы.

Перечисленные взгляды на механизм осушения силикагеля в озонной среде позволяют осознанно оптимизировать этот процесс и создавать технические средства (осушители) для искусственного снижения влажности воздуха на объектах АПК. Функциональная схема одного из таких осушителей адсорбционного осушителей представлена на рисунке.

Адсорбционный осушитель воздуха содержит корпус 1, разделенный перегородкой 2 на зону 3 осушения воздуха и зону 4 регенерации. Внутри корпуса 1 размещен ротор 5, заполненный силика-

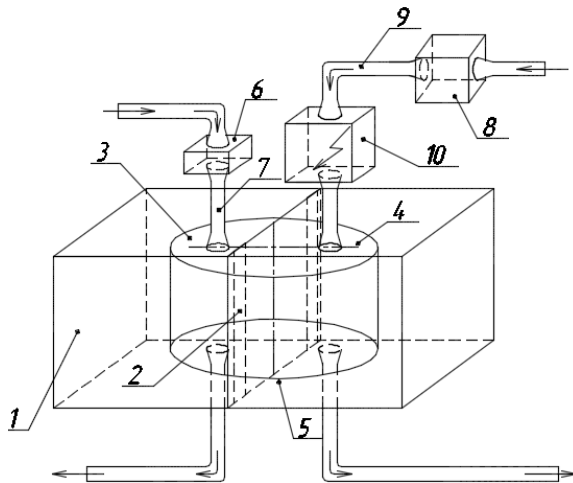


Рис.1. Функциональная схема адсорбционного осушителя воздуха с регенерацией силикагеля в озон-воздушной среде

гелем. Ротор 5 имеет возможность вращения относительно своей продольной оси.

Снаружи корпуса 1 осушителя расположен вентилятор 6, который посредством трубопровода 7 связан с зоной 3 осушения воздуха. Там же установлен вентилятор 8, соединенный трубопроводом 9 с зоной регенерации 4 через озонатор 10.

Адсорбционный осушитель воздуха работает следующим образом. Вентилятор 6 через трубопровод 7 подает влажный воздух из помещения в зону 3 осушения воздуха. При этом осушаемый воздух проходит через слой адсорбирующего силикагеля, находящегося в роторе 5. Здесь происходит снижение влажности осушаемого воздуха за счет поглощения влаги адсорбирующим веществом. Далее осушенный воздух снова попадает в помещение. Ротор 5 поворачивается, перемещая увлажненный силикагель из зоны 3 обработки в зону 4 регенерации. Вентилятор 8 подает наружный воздух (воздух с улицы) через трубопровод 9 в озонатор 10. Озонированный воздух с концентрацией озона 10...50 мг/м³ взаимодействует с влажным

силикагелем, который интенсивно регенерируется. Выделившаяся из силикагеля влага выносится обратно на улицу вместе с удаляемым воздухом.

Выводы

Таким образом, использование озона в качестве стимулятора регенерации силикагеля может рассматриваться как эффективный прием повышения эффективности осушения воздуха при реализации адсорбционного способа.

Библиографический список

1. Андреев С.А., Судник Ю.А., Белоусова И.В. Энергосберегающее управление влажностью воздуха на объектах АПК // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ имени В.П. Горячкина. 2010. № 2 (1). С. 7–12.
2. Polaris PUN 3005Di / State of Delaware USA, 1313 N. Market Street, Suite 5100, Wilmington, DE 19801, United States of America. P. 46.
3. Medisana. MedibreezeIttensiv / Medisana AG Itterpark 7–9, 40724 Hilden Deutschland, Seite 36.
4. Осушитель воздуха. Патент Японии № 2002012499, МКИ 8F24F7/007, 2007 г.
5. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники: Монография. 2-е изд. испр., перераб. и доп. М.: Химия, 1984. 592 с.
6. TROTEC GmbH & Co. KG Grebbener Strasse? 7, D-52525, Heinsberg. 36 p.
7. Андреев С.А. Мещанинова П.Л. Энергосберегающее осушение воздуха на объектах АПК // Техника и технологии: пути инновационного развития: Материалы II Международной научно-практической конференции 29 июня 2012 г. Курск: Юго-Западный государственный университет. 2012. С. 30–35.
8. Андреев С.А. и др. Способ и устройство для осушения воздуха. Патент на изобретение РФ № 2502023, МПК F24 F/00 (2006.11), заявка 201115376 от 23.12.2011 г., опубл. 20.12.2013 г.
9. Лунин В.В., Карягин Н.В., Тимченко С.Н., Самойлович В.Г. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов. Изд-во: МАКС-Пресс, 2008. 216 с.

Андреев Сергей Андреевич – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: 8-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Загинайлов Владимир Ильич – д.т.н., профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко; 127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: 8-903-108-37-37; e-mail: energo-viz@mail.ru.

Мещанинова Полина Львовна – аспирантка кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: 8-910-475-54-53; e-mail: polinochka_m@list.ru.

Статья поступила 22.12.2015

INCREASING EFFICIENCY OF SILICA GEL REGENERATION IN DESICCANT DEHUMIDIFIERS

S.A. ANDREYEV, V.I. ZAGINAILOV, P.L. MESCHANINOVA

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev

Humidity makes a significant impact on the effectiveness of many agricultural processes. Maintaining the atmospheric humidity within the prescribed limits is still a difficult engineering task due to the imperfection of modern dehumidifiers, their high cost and considerable energy consumption. The carried out research is aimed at improving the design of adsorption dehumidifiers by changing the mode of regeneration of silica gel. The main feature of the improved dehumidifiers is the substitution of hot air in the regeneration zone with room temperature air containing ozone at a concentration of 10...50 mg/m³. It has been found that the use of ozone considerably intensifies the process of silica gel regeneration but has no influence on the technological process and is not detrimental to the environment. Several hypotheses have been proposed to explain the mechanism of ozone intensifying action. Here belongs a hypothesis of the formation of active moisture centres in the gas phase and the formation of humidity pressure in the air-silica gel environment, a hypothesis of a surface tension change in the silica gel moisture, and a hypothesis based on the change in electrical properties of the silica gel surface. The paper contains a description of a desiccant dehumidifier with silica gel regeneration in the ozone-air environment.

Key words: air dehumidification, adsorption, silica gel regeneration, ozone, power consumption.

References

1. Andreyev S.A., Sudnik Y.A., Belousova I.V. Energosberegayushchee upravleniye vlazhnost'yu vozdukh anaob'ektakh APK [Energy-saving humidity control in farm facilities] / Vestnik FGOU VPO MGAU imeni V.P. Goryachkina [Herald of FSEIHPE MSAU named after V.P. Goryachkin]. 2010. Issue 2 (1). P. 7–12.
2. Polaris PUH 3005Di / State of Delaware USA, 1313 N. Market Street, Suite 5100, Wilmington, DE 19801, United States of America, P. 46.
3. Medisana. Medibreeze Iltensiv / Medisana AG Itterpark 7–9, 40724 Hilden Deutschland, Seite 36.
4. Air Dryer. Japanese Patent number 2002012499, MCI 8F24F7 / 007 2007.
5. Keltsev N.V. Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki: Monografiya. [Fundamentals of adsorption technology / Monograph] / 2-nd ed. Rev., Revised. and add. M.: Chemistry, 1984. 592 p.
6. TROTEC GmbH & Co. KG Grebbener Strasse? 7, D-52525, Heinsberg. 36 p.
7. Andreyev S.A., Meshchaninova P.L. Energosberegayushchee osusheniye vozdukh anaob'ektakh APK [Energy-saving air dehumidification in farm facilities] / Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 29 iyunya 2012 g. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet [Technology: the Path of Innovative Development. Materials of the II International Scientific-Practical Conference of 29 June 2012, South-West State University]. Kursk, 2012. P. 30–35.
8. Andreyev S.A. et al. Method and apparatus for dehumidification. The invention patent of the Russian Federation № 2502023, IPC F24 F7 / 00 (2006.11) 201 115 376 Applied on 23.12.2011, published on 20.12.2013.
9. Lunin V.V., Karyakin N.V., Tkachenko S.N., Samoilovich V.G. Sposoby polucheniya ozona i sovremennyye konstruktsii ozonatorov [Methods of ozone production and modern ozone generator designs]. Publishing House MAKS Press, 2008. 216 p.

Sergey A. Andreyev – PhD (Eng), Associate Professor, “Automation and Robotization of Technological Processes” Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; phone: +7-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Vladimir I. Zaginailov – PhD (Eng), Professor, “Electric Power Supply and Electrical Engineering” Department named after Academician I.A. Budzko, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; phone: +7-903-108-37-37; e-mail: energo-viz@mail.ru.

Polina L. Meschaninova – a postgraduate student, «Automation and Robotization of Technological Processes» Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; phone: +7-910-475-54-53; e-mail: aolinochka_m@list.ru.

Received on December 22, 2015