

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-20251-159-167>
УДК 619.614.31:637.5'64

Поступила в редакцию 30.04.2025
Received 30.04.2025

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛИРОВАНИЯ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОРФА

А. Э. Томсон, Т. Я. Царюк, Т. В. Соколова,
Ю. Ю. Навоша, В. С. Пехтерева, А. С. Марзан

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведено гранулирование образцов торфа различной влажности методом экструзии на шнековом и матричном грануляторах. Установлено, что для гранулирования на шнековом грануляторе оптимальная влажность находится в пределах 60–73 %, а для матричного (пеллетера) – 21–35 %. Показано, что по сорбционным свойствам и скорости поглощения из газовой фазы водного раствора аммиака, воды и аммиака образцы гранулированного торфа более эффективны по сравнению с исходным торфом. Изучение кинетики поглощения выявило, что наряду с механизмом непосредственного взаимодействия аммиака с карбоксильными, фенольными и другими реакционно-способными группами органического вещества торфа значительный вклад в общее поглощение аммиака вносит закрепление аммиака за счет менее прочных форм связи. Показано, что химически, т. е. в обменной и в форме малоподвижных химических соединений, закрепляется около 8 % сорбированного аммиака. Спектральными методами подтверждено, что связывание аммиака торфом обусловлено прочным ионообменным взаимодействием со свободными карбоксильными группами до практически полного их замещения ионами аммония, а также образованием водородных связей аммиака со структурной матрицей торфа. Установлено влияние на сорбционные и водно-физические свойства диаметра гранул, полученных методом экструзии на шнековом грануляторе: с увеличением диаметра гранул водопоглощение и сорбционные свойства повышаются, что связано с получением более рыхлой структуры и большей доступностью центров сорбции.

Ключевые слова: торф; экструзионный метод гранулирования; шнековый и матричный грануляторы; аммиак; сорбция; кинетика.

Для цитирования. Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Навоша Ю. Ю., Пехтерева В. С., Марзан А. С. Влияние гранулирования на сорбционные свойства торфа // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 159–167.

THE EFFECT OF GRANULATION ON THE SORPTION PROPERTIES OF PEAT

A. E. Thomson, T. Ya. Tsaryuk, T. V. Sokolova,
Yu. Yu. Navosha, V. S. Pekhtereva, A. S. Marzan

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The granulation of peat samples of various humidity was carried out by extrusion on screw and matrix granulators. It was found that for granulation on a screw granulator, the optimal humidity is in the range of 60–73 %, and for a matrix (pellet) – 21–35 %. It is shown that in terms of sorption properties and absorption rate from the gas phase of an aqueous solution of ammonia, water and ammonia, samples of granular peat are more effective than the original peat. The study of absorption kinetics has shown that, along with the mechanism of direct interaction of ammonia with carboxylic, phenolic and other reactive groups of peat organic matter, a significant contribution to the total absorption of ammonia is made by the fixation of ammonia due to less strong forms of bonding. Chemically, i. e., about 8 % of the sorbed ammonia is fixed in the exchange and in the form of inactive chemical compounds. Spectral methods have confirmed that the binding of ammonia by peat is due to a strong ion-exchange interaction with free carboxyl groups until they are almost completely replaced by ammonium ions, as well as the formation of hydrogen bonds of ammonia with the structural matrix of peat. The effect on the sorption and water-physical properties of the diameter of granules obtained by extrusion on a screw granulator has been established: with an increase in the diameter of granules, water absorption and sorption properties increase, which is associated with a looser structure and greater accessibility of sorption centers.

Keywords: peat; extrusion granulation method; screw and matrix granulators; ammonia; sorption; kinetics.

For citation. Thomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Navosha Yu. Yu., Pekhtereva V. S., Marzan A. S. The effect of granulation on the sorption properties of peat. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 159–167.

Введение. Специфические условия промышленного содержания птицы, выражающиеся в концентрации значительного поголовья разновозрастной птицы на небольших ограниченных площадях, использование безоконных птичников, в которых выращивается одновременно по 20–25 тыс. голов бройлеров, особенно при использовании клеточной технологии, требуют чрезвычайно внимательного отношения к соблюдению нормативных гигиенических параметров. За счет естественных процессов концентрация пыли в воздухе выводного шкафа на инкубаторах достигает 35 мг/дм^3 , при нормативе для воздуха птичников $1,9\text{--}2,0 \text{ мг/дм}^3$. Кроме того, в запыленной воздушной среде могут присутствовать патогенные микроорганизмы, а слабо развитая в этот период иммунная система не в состоянии преодолеть «наступление» микрофлоры. Цыпленок заболевает, культивирует в себе возбудителя и передает его сверстникам. В связи с этим контроль за запыленностью воздуха в помещении птицефабрик должен осуществляться очень тщательно. Поэтому применение на птицефабриках различного рода подстилочных средств должно базироваться на принципах недопущения дополнительного количества пыли.

Сегодня в промышленных условиях торф добывается путем фрезерования верхнего слоя залежи, а следовательно, содержит большое количество пылевидной фракции (до 50 % фракции $<0,5 \text{ мм}$). Требования, предъявляемые к качеству воздушной среды на птицефабриках, не позволяют использовать материалы, повышающие запыленность воздуха. В связи с этим разработка технологии получения специальных гранулированных форм торфа, сочетающих основные свойства природного материала (высокие значения водопоглощения, газопоглощения и биоцидности) с улучшенными физико-механическими свойствами композитов, является актуальной.

Любые порошкообразные материалы и их композиции могут быть определенным способом сгранулированы [1]. Гранулирование проводят с целью улучшения качества как промежуточных, так и готовых продуктов. В зависимости от нужной структуры и свойств гранулированных материалов, предъявляемых требований к продукту и технико-экономических обоснований применяют различные способы гранулирования [2].

Формование методом экструзии – процесс переработки материала путем размягчения или пластификации и придания формы продавливанием через экструзионную головку. В процессе экструзионной обработки под действием значительных скоростей сдвига, высоких температур и давления происходит превращение механической энергии в тепловую, что ведет к различным по глубине изменениям основных компонентов перерабатываемого сырья. Формование методом экструзии возможно на шнековом или матричном грануляторе.

Цель работы – изучить влияние гранулирования на физико-технические и сорбционные свойства торфа.

Объекты и методы исследования. Для проведения исследований использовали верховой пушицевый торф месторождения «Туршевка-Чертово» степенью разложения 40–45 %, фракции 0,5–3,0 мм. При обосновании оптимальных параметров гранулирования торфа с целью определения диапазона влажности, обеспечивающего получение гранул требуемого качества, подготовлены образцы торфа с влажностью от 20 до 80 %.

Гранулирование осуществляли на шнековом грануляторе и матричном грануляторе (пеллетере) с диаметром фильер 5 мм.

С целью оценки влияния формования на сорбционные свойства торфа провели сравнительное исследование физико-технических и сорбционных свойств исходного и гранулированного экструзионным способом торфа по отношению к водному раствору аммиака и воде в статических условиях.

Количество поглощенных из газовой фазы водного раствора аммиака, воды и аммиака оценивали весовым методом. Для этого чашки Петри с навеской торфа 10,0 г помещали в эксикаторы, содержащие 100 мл водного раствора аммиака (25 %) или такое же количество дистиллированной воды. Через определенное время чашки Петри извлекали и взвешивали с точностью до четвертого знака. По результатам взвешиваний рассчитывали количество поглощенного водного раствора аммиака или воды на абсолютно сухое вещество торфа. Количество поглощенного аммиака оценивали по разности между привесом водного раствора аммиака и воды. Длительность эксперимента составила 30 сут (720 ч).

Результаты исследования и их обсуждение. Эффективность формования и качество полученных гранул оценивали визуально. Результаты представлены в табл. 1, из анализа данных которой следует, что диапазон влажности гранулируемого торфа, обеспечивающий получение гранул удовлетворительного качества, для шнекового гранулятора составляет 60–73 %, а для матричного – 21–35 %.

Результаты оценки физико-технических свойств исходного и гранулированного торфа показали (табл. 2), что при использовании матричного гранулятора получают наиболее плотные гранулы, а это существенно ухудшает их водно-физические свойства (водопоглощение уменьшается в 2 раза по сравнению с исходным негранулированным торфом). В то же время в результате грануляции сорбционные свойства торфа заметно повышаются по сравнению с фрезерным торфом, но способ гранулирования практически не влияет на эту характеристику.

Таблица 1. Результаты определения диапазона влажности при гранулировании торфа на разных устройствах**Table 1. Results of determining the humidity range during peat granulation on different devices**

Шнековый гранулятор		Матричный гранулятор	
Влажность формируемой смеси	Результат	Влажность формируемой смеси	Результат
45,8	Не формируется	25,4	Гранулы влажностью 23,8 %
55,0	То же	28,0	Гранулы влажностью 26,4 %
61,8	Гранулы влажностью 61,2 %	30,4	Гранулы влажностью 29,4 %
66,0	Гранулы влажностью 65,7 %	35,1	Гранулы влажностью 33,8 %
70,3	Гранулы влажностью 69,4 %	40,1	Залипание отверстий
75,4	Залипание отверстий	–	–

Таблица 2. Физико-технические и сорбционные свойства исходного и гранулированного торфа**Table 2. Physico-technical and sorption properties of the initial and granular peat**

Способ гранулирования	Влажность, %	Насыпная плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Поглощение водного раствора аммиака за 48 ч, мг/г а. с.
Исходный торф фракции 0,5–3,0 мм	11,8	315,8	163,2	107,2
Шнековый гранулятор	12,1	376,9	137,8	153,3
Матричный гранулятор	10,3	450,4	84,9	158,8

Результаты эксперимента по оценке кинетики сорбции водного раствора аммиака, воды и аммиака из газовой фазы представлены на рис. 1.

Известно, что раствор аммиака в воде обладает щелочной реакцией, которая происходит, так как часть молекул NH_3 соединяется с водой и образует гидроксид-ионы, согласно уравнению реакции $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ и далее $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NH}_4\text{OH}$.

Таким образом, в системе устанавливается равновесие $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NH}_4\text{OH}$, где содержатся молекулы NH_3 , ионы NH_4^+ и OH^- , а также молекулы NH_4OH . Установлено, что основная масса растворенного аммиака находится в растворе в виде молекул NH_3 ; присутствием других компонентов можно пренебречь.

Из представленных на рис. 1 данных следует, что ход кривых кинетики поглощения водного раствора аммиака и молекул аммиака схож. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальная скорость поглощения водного раствора аммиака и молекул аммиака наблюдается в начале сорбции. Первые порции аммиака вступают во взаимодействие со свободными карбоксильными группами. Это приводит к смещению существующего равновесия и протеканию ионообменных процессов. Далее следуют более пологие участки, а затем – некоторый подъем кривых. С ростом pH дисперсионной среды во взаимодействие вступают менее активные фенольные гидроксилы. Скорость взаимодействия при этом немного падает. Однако процесс поглощения аммиака и его водного раствора не прекращается. Такая особенность сорбционного взаимодействия объясняется, по-видимому, тем, что по мере накопления аммиака и влаги становятся доступными для взаимодействия все новые функциональные группы. Так как торф относится к сорбентам с высокой подвижностью «каркаса» надмолекулярных структур, с ростом pH и количества одновалентных катионов NH_4^+ в дисперсионной среде органические компоненты торфа интенсивно набухают, что и вызывает появление новых центров сорбции.

Также из данных на рис. 1 следует, что гранулирование торфа оказывает положительное влияние на процесс поглощения указанных выше компонентов, причем наибольший эффект наблюдается на образце, сформированном на матричном грануляторе. Процесс поглощения из газовой фазы водного раствора аммиака и воды можно разделить на две составляющие: сорбцию и десорбцию. Так как гранулы, полученные на пеллетере, более плотные, процесс десорбции протекает менее интенсивно по сравнению с десорбцией изучаемых компонентов из исходного торфа и гранул, полученных на шнековом грануляторе.

На рис. 2 представлены кривые скорости поглощения из газовой фазы водного раствора аммиака, аммиака и воды торфом фракции 0,5–3,0 мм, формованными гранулами и пеллетами. Из анализа данных следует, что скорость поглощения аммиака и воды пеллетами выше, чем гранулами и торфом фракции 0,5–3,0 мм. При этом скорость поглощения гранулами и пеллетами примерно одинакова и значительно отличается от скорости поглощения указанных компонентов торфом в первые 50 ч (3 сут) сорбции. Спустя примерно 400 ч (17 сут) эксперимента скорости сорбции выравниваются.

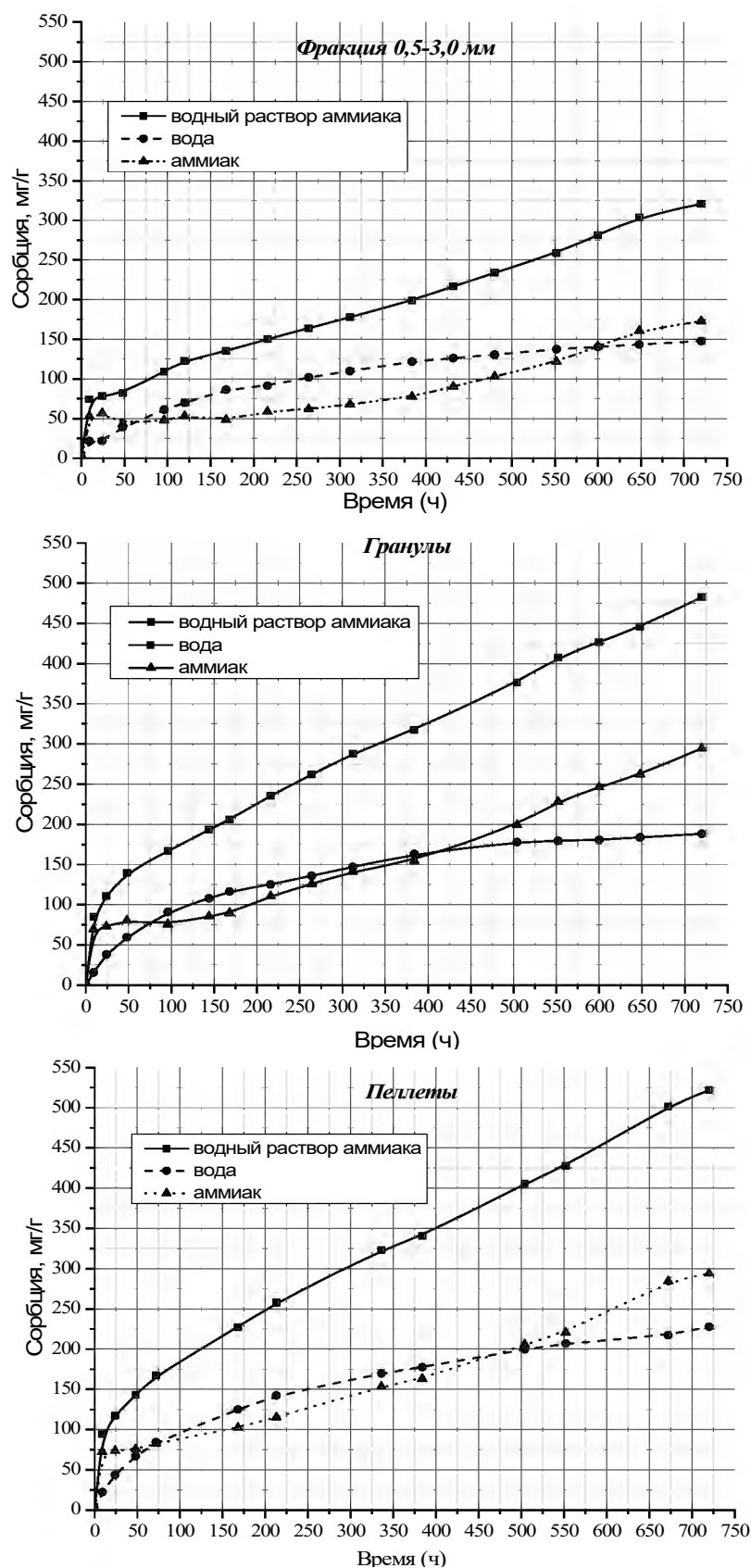


Рис. 1. Влияние способа формирования на сорбционные свойства торфа

Fig. 1. Influence of the molding method on the sorption properties of peat

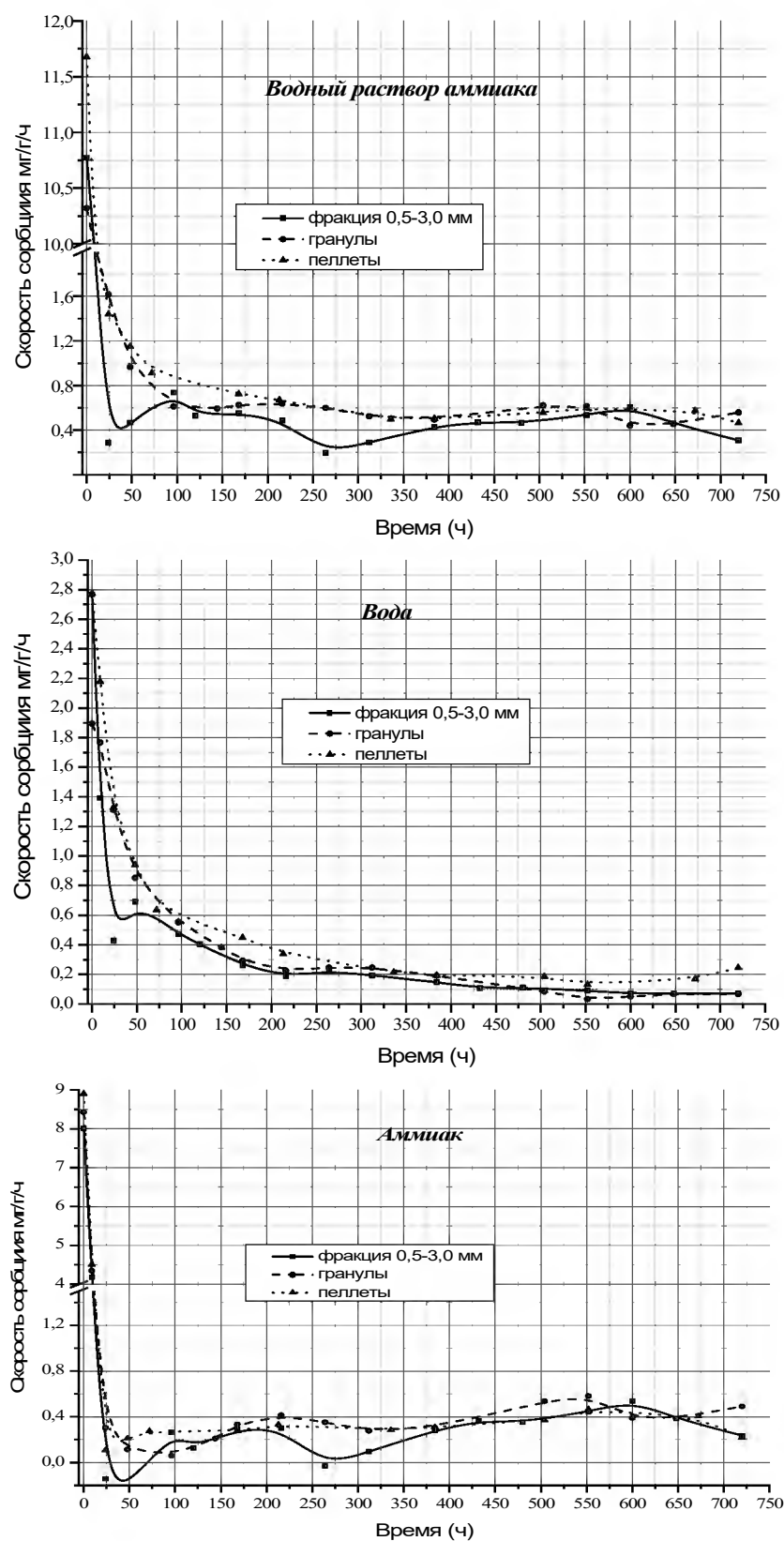


Рис. 2. Скорость сорбции торфом паров аммиака и воды из газовой фазы в зависимости от способа гранулирования

Fig. 2. The rate of sorption of ammonia and water vapor from the gas phase by peat, depending on the granulation method

Для выяснения вклада в величину сорбционной емкости химически закрепленных, а также физически и физико-химически связанных аммиака и воды образцы торфа подвергали выветриванию и сушке при температуре 105 °С до постоянного веса, результаты чего представлены на рис. 3 и 4.

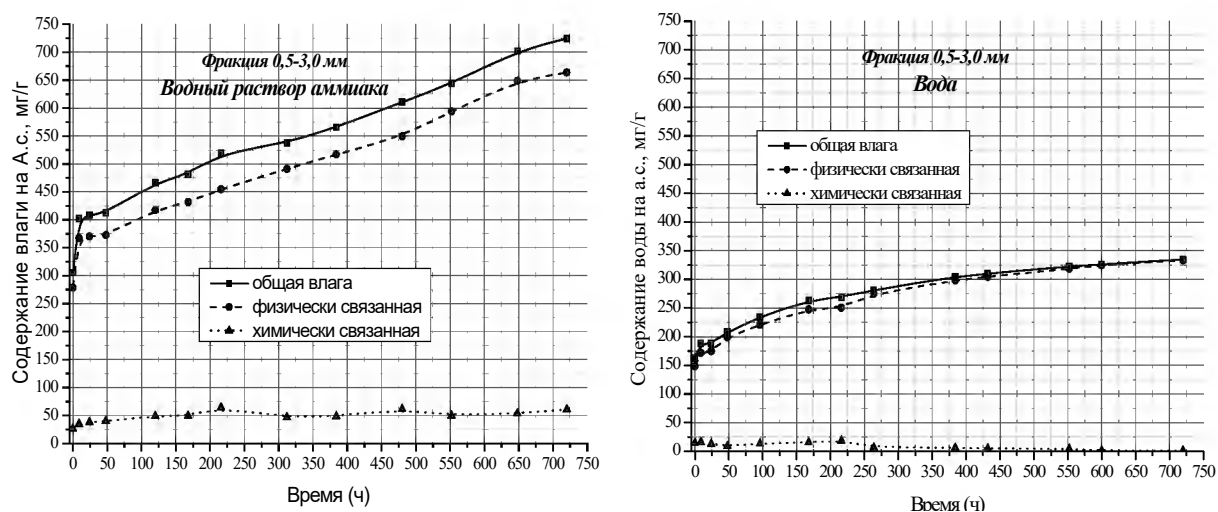


Рис. 3. Общая, физическая и химическая сорбция водного раствора аммиака и воды в газовой фазе торфом фракции 0,5–3,0 мм

Fig. 3. General, physical and chemical sorption of an aqueous solution of ammonia and water in the gas phase by peat of 0.5–3.0 mm fraction

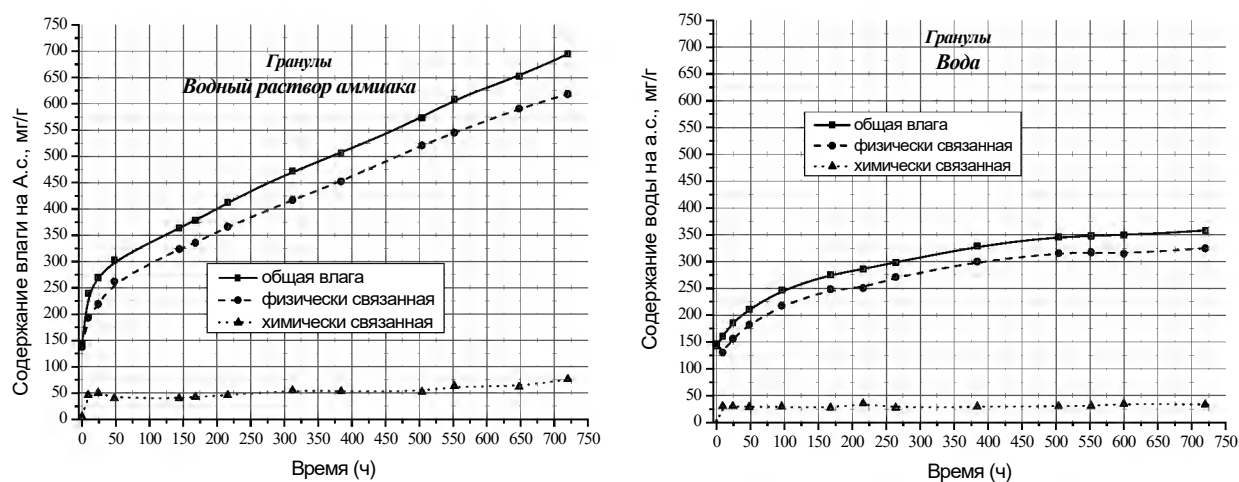


Рис. 4. Общая, физическая и химическая сорбция водного раствора аммиака и воды в газовой фазе гранулированным торфом

Fig. 4. General, physical and chemical sorption of an aqueous solution of ammonia and water in the gas phase by granular peat

Из анализа данных следует, что химически, т. е. в обменной и в форме малоподвижных химических соединений, закрепляется около 8 % сорбированного аммиака. Остальной физически и физико-химически связанный аммиак (92 %) выветривается вместе с влагой при сушке.

Таким образом, наряду с механизмом непосредственного химического взаимодействия аммиака с карбоксильными, фенольными и другими реакционно-способными функциональными группами органического вещества торфа значительный вклад в общее поглощение вносит закрепление аммиака за счет менее прочных форм связи.

С целью выяснения прочности связывания аммиака с торфом образцы торфа после сорбции аммиака подверглись выдержке в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 1, 2 и 3 ч и были исследованы методом ИК-спектроскопии. На рис. 5 представлены ИК-спектры данных образцов.

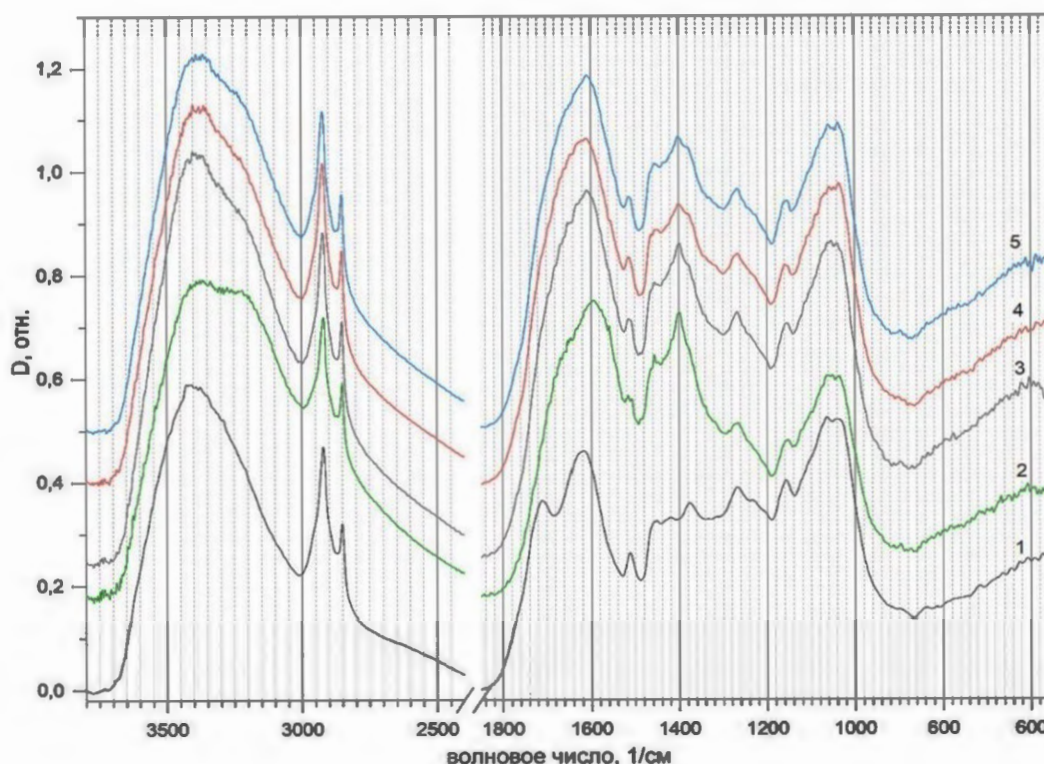


Рис. 5. ИК-спектры образцов торфа после сушки их при температуре 105 °С:
 1 – исходный образец торфа; 2 – образец торфа после сорбции аммиака; 3 – образец торфа после сорбции аммиака, выдержка 1 ч; 4 – образец торфа после сорбции аммиака, выдержка 2 ч; 5 – образец торфа после сорбции аммиака, выдержка 3 ч

Fig. 5. IR spectra of peat samples after drying at 105 °C:
 1 – initial peat sample; 2 – peat sample after ammonia sorption; 3 – peat sample after ammonia sorption, exposure of 1 hour; 4 – peat sample after ammonia sorption, exposure of 2 hours; 5 – peat sample after ammonia sorption, exposure of 3 hours

Как следует из представленных данных, сорбция аммиака приводит к практически полному исчезновению полосы поглощения свободных карбоксильных групп (1708 см^{-1}), при этом появляются полосы поглощения в области 1600 и 1400 см^{-1} – асимметричные и симметричные колебания карбоксилат-ионов. Одновременно растет поглощение в области 3200 см^{-1} – валентные колебания -NH водородных связей ионов аммония. Выдерживание образца после сорбции аммиака в течение 1 ч при температуре 105 °C не приводит к появлению полосы при 1708 см^{-1} , но наблюдается уменьшение интенсивности поглощения при 3200 см^{-1} . Одновременно изменяется соотношение интенсивности полос при 1600 и 1400 см^{-1} . Выдерживание образца с сорбированным аммиаком при 2 и 3 ч при температуре 105 °C практически не приводит к заметным изменениям в спектрах.

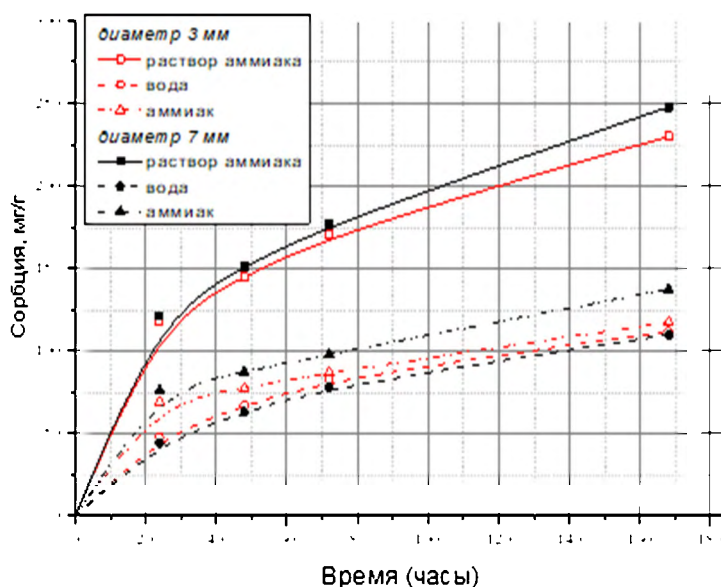
Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что уже при выдержке в 1 ч происходит удаление практически всего слабо связанного аммиака из структуры торфа. Это подтверждается уменьшением интенсивности полосы в области 3200 см^{-1} и изменением соотношения интенсивностей полос 1600 и 1400 см^{-1} . Полоса 1400 см^{-1} – валентные колебания иона аммония. Аммиак, связанный ионными связями с карбоксильными группами, не удаляется. Отсутствие изменения в спектрах образцов, выдержанных при 2 и 3 ч, свидетельствует о прочности связей оставшегося количества аммиака.

Что касается сорбции воды, то 99,5 % в общее поглощение вносят физическая и физико-химическая составляющие и только около 0,5 % – химическое взаимодействие молекул воды с функциональными группами торфа (см. рис. 3, 4).

С целью определения оптимального размера гранул при использовании последних в качестве компонента подстилки при напольном выращивании цыплят-бройлеров проведено гранулирование торфа методом экструзии на шнековом грануляторе с размером отверстий фильеры в кольцевой матрице (фильерной плите) 3, 5 и 7 мм. Изучены физико-технические, водно-физические и сорбционные свойства полученных гранул (табл. 3 и рис. 6).

Таблица 3. Физико-технические и сорбционные свойства гранулированного торфа**Table 3. Physico-technical and sorption properties of granular peat**

Размер отверстия фильеры, мм	Влажность, %	Диаметр гранулы, мм	Насыпная плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Поглощение водного раствора аммиака за 48 ч, мг/г
3	12,5	2,0	492,0	103,6	145,2
5	13,0	3,5	450,0	137,8	145,6
7	12,6	5,0	347,0	150,8	151,5

**Рис. 6. Кинетика сорбции в зависимости от размера гранул торфа****Fig. 6. Sorption kinetics depending on the size of peat granules**

Анализ представленных данных свидетельствует, что с увеличением диаметра гранул водопоглощение и сорбция водного раствора аммиака увеличиваются, что, по-видимому, связано с получением гранулированного материала более рыхлой структуры, а следовательно, с большей доступностью центров сорбции.

Таким образом, рекомендуется гранулировать торф на шнековом грануляторе, используя кольцевую матрицу с диаметром фильеры не менее 7 мм.

На основании проведенных исследований установлено, что для применения торфа в качестве компонента в глубокую подстилку при напольном содержании птицы необходимо его гранулирование. При этом уменьшается запыленность помещения и улучшаются сорбционные свойства торфа.

Список использованных источников

1. Ринкевич, В. П. Анализ способов получения и рецептур гранулированных композитов различного назначения на основе торфа / В. П. Ринкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – № 4 (17). – С. 172–179.
2. Чистый, И. Н. Производство гранулированного торфа / И. Н. Чистый. – Минск : Наука и техника, 1980. – 144 с.

References

1. Rinkevich V. P. *Analiz sposobov polucheniya i receptur granulirovannykh kompozitov razlichnogo naznacheniya na osnove torfa* [Analysis of methods of obtaining and formulations of granulated composites for various purposes on the basis of peat]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo-universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2007, no. 4 (17), pp.172–179. (in Russian)
2. Chistyj I. N. *Proizvodstvo granulirovannogo torfa* [Production of granulated peat]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1980, 144 p. (in Russian)

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Царюк Татьяна Яковлевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

Марзан Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of Lab of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Tatiana Ya. Tsaryuk – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Yulian Yu. Navoscha – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: navoscha@tut.by

Victoriya S. Pehtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru

Anastasiya S. Marzan – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marr_29@mail.ru