

УДК 631.333, 624.139.3

ПРЕДПОСЫЛКИ И ОБОСНОВАНИЕ РАННЕВЕСЕННОГО ВНЕСЕНИЯ ЖИДКОЙ ФРАКЦИИ НАВОЗА В УСЛОВИЯХ МЕЛКОТОВАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

П.А. Смирнов, Д.Ю. Федоров, Е.В. Прокопьева

Чувашская государственная сельскохозяйственная академия
428003, Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация. Суточное замерзание поверхностного почвенного слоя не является препятствием для проникновения жидкой фракции навоза вглубь почвенного пласта. При этом слой обладает достаточной прочностью и несущей способностью для механизированного внесения жидкой фракции навоза разливом по поверхности поля. В качестве критерия оценки влагопроницаемости жидкой фракции навоза в мерзлую почву (δ , кг/м²с) принято частное массы жидкой фракции m (кг) к площади $S_{\text{в}}$ (м²) и времени впитывания T , (с). По принятому показателю определены участки с наличием подпочвенной неоттаявшей мерзлоты.

Ключевые слова: бесподстильный навоз, внесение навоза, показатель влагопроницаемости.

Введение. Проблема эффективного использования жидкой фракции навоза крупного рогатого скота (КРС), свиней возникла уже давно. Во-первых, жидкая фракция навоза является весьма эффективным удобрением как для основного внесения, так и для подкормки; во-вторых, в настоящее время жидкая фракция навоза из крупных животноводческих комплексов стекает в близлежащие водоемы, овраги, значительно усложняя без того непростую экологическую обстановку в данной местности [3], [4], [7]. Следует отметить, что в Российской Федерации около 50 % крупного рогатого скота (КРС) содержится в сельскохозяйственных предприятиях, остальная часть – в составе крестьянских фермерских (КФХ) и личных подсобных хозяйств. Соответственно, выход навоза также распределяется приблизительно поровну по категориям хозяйств.

Ввиду ограниченного наличия оборотных средств на приобретение сложных удобрений как у крупных сельскохозяйственных предприятий (СХПК), так и сельскохозяйственного мелкотоварного производства (КФХ и ЛПХ) одна из их первоочередных задач – рациональное использование имеющихся в хозяйстве органических удобрений. В данной работе исследуются эффективные способы практического использования жидкой фракции навоза в ранневесенний период.

В нашей работе жидкая фракция навоза рассматривается как талая вода, также был изучен ряд концептуальных подходов к решению задачи фильтрации талой воды в мерзлую почву, которые можно применять исходя из климатических условий региона [1], [8].

Практика внесения круглогодичного широкомасштабного сжиженного свиного навоза непосредственно из комплекса на поля активно применяется в ЗАО «Прогресс» Чебоксарского района Чувашской Республики [8]. Учитывая все положительные (минимальное количество оборудования и технических средств) и отрицательные (внесение только на не склоновых землях) факторы внесения навоза в условиях мелкотоварного производства было принято решение об ограничении зимнего внесения разливом по мерзлой почве и накоплении жидкой фракции в специальных емкостях.

Цель работы – изучение технической возможности ранневесеннего внесения жидкой фракции навоза разливом по мерзлой почве на кормовые угодья.

Актуальность и практическая значимость исследования – разрешение задачи переполнения емкости-накопителя жидкой фракции навоза за зимний период с соблюдением экологических требований.

В соответствии с заявленной целью были поставлены следующие задачи:

- изучить возможность проезда агрегата Т-25А+ЗЖВ-1,8 по вновь подмерзшему в результате ночных заморозков полю или по не полностью оттаявшему полю;
- экспериментально обосновать проникновение жидкой фракции навоза в мерзлую почву;
- разработать рекомендации для широкого применения весеннего внесения жидкой фракции навоза в условиях мелкотоварного производства.

Материалы и методы исследований. Для зимнего стойлового периода экспериментально был определен среднесуточный выход жидкой фракции навоза на одну голову – 8,96 л в сутки (среднее квадратическое отклонение $\sigma=1,36$ л, коэффициент вариации $v=15,14\%$) и вместимость жижеборника – 200 – 250 л при выемке через 20 – 25 дней [7].

В исторический период возникновения сельскохозяйственного мелкотоварного производства в составе СХПК ему отводились самые неудобные мелкоконтурные, склоновые земли [3]. По этой причине внесение жидкой фракции навоза по мерзлой почве, особенно на склоновых землях, было признано нецелесообразным и в указанный период времени было предложено накопление фракции.

В условиях северных районов Чувашской республики почва в мерзлом состоянии находится с 10 – 15 ноября по 30 марта (130 – 134 дня) [2]. Соответственно, теоретически на этот период потребуется накопительная емкость вместимостью 1170 – 1200 литров. Однако, учитывая вариабельность ($v=15,14\%$) среднесуточного выхода жидкой фракции, весьма вероятно проникновение талых вод в жижеборник или увеличение числа поголовья, что может привести к переполнению уже установленной емкости-накопителя.

Поэтому возникает практическая необходимость ранневесеннего внесения жидкой фракции навоза по не полностью оттаявшей или вновь замерзшей почве вследствие сильных ночных заморозков. Такое внесение возможно в утренние часы от 5.00 до 8.00 часов утра. Технологическая операция внесения жидкой фракции навоза вполне осуществима в условиях мелкотоварного производства, что позволяет выполнить ее в полном объеме в необходимые сроки.

Технологические предпосылки такого внесения весьма оптимистичны: во-первых, обеспечивается проходимость машинно-тракторных агрегатов (МТА), поскольку движители трактора и жижевыбрасывателя не вязнут в почве; во-вторых, при этом уже возможно проникновение жидкой фракции навоза в почву, тогда как в зимний период влага в мерзлую почву практически не проникает [1]. Таким образом, возникает необходимость максимального использования начального периода проникновения влаги в почву для насыщения её жидкими удобрениями.

Следует учесть промывной режим талых вод в регионе, хотя и не ежегодный, но представляющий опасность экологического загрязнения местности, и процессы выноса минеральных и органических веществ нисходящими потоками талых вод.

На горизонтальном участке поля были разбиты два ряда по семь и два ряда по шесть точек. Расстояние между рядами и точками – 2,0 м. На каждую точку вносилось 10 л (10 кг) жидкой фракции навоза. В итоге суммарное внесение составило 25 т/га, что приблизительно соответствует механизированному его внесению агрегатом Т-25А+ЗЖВ-1,8 с расходом жидкости 10 кг/с и с рабочей поступательной скоростью агрегата 1,5 м/с (первая передача на средних оборотах двигателя).

Опытные сливы проводились приблизительно с расходом 3 л /с вручную. С начала слива фиксировалось время для определения скорости инфильтрации жидкой фракции навоза в почву. Секундомер выключался только после полного впитывания жидкой фракции навоза в почву.

Площадь экспериментального порционного разлива преимущественно представляла собой форму эллипса. Поэтому после впитывания измерялись во взаимно перпендикулярном направлении максимальный (b_{max} , см) и минимальный (b_{min} , см) диаметры эллиптической площади впитывания.

Площадь эллипса определяется как:

$$S_e = \frac{\pi b_{min} b_{max}}{4} \quad (1)$$

Соотношение с эквивалентной площадью окружности составляло:

$$\frac{\pi b_{min} b_{max}}{4} = \pi \frac{d_{экв}^2}{4} \quad (2)$$

Отсюда
$$b_{min} b_{max} = d_{экв}^2 \quad (3)$$

или
$$d_{экв} = \sqrt{b_{min} b_{max}}. \quad (4)$$

Таким образом, для точных расчетов диаметр эквивалентной окружности определяется в квадратичной форме, а не простым сложением и делением на два.

В качестве относительного показателя влагопроницаемости жидкой фракции навоза в мерзлую почву принято частное массы жидкой фракции m (кг) к площади S_e (m^2) и времени впитывания T , (с):

$$\delta = \frac{m}{S_e T}. \quad (5)$$

Для хронометража применены электронные секундомеры, линейный измерительный инструмент – линейка длиной 1,0 м. Обработка результатов выполнена в программной среде «Excel-2007».

Результаты исследования и их обсуждение. Полученные опытные данные представлены в таблице 1.

Результаты экспериментального анализа приведены в таблице 1.

Разлив одинакового количества (10 л) жидкой фракции навоза на поверхности горизонтального участка поля располагается преимущественно в виде эллипса. Коэффициент вариации (v , %) максимального (b_{max} , см) и минимального (b_{min} , см) диаметров эллиптической площади впитывания, измеренных во взаимно перпендикулярном направлении, находятся в пределах средних значений (14,3 и 12,75 %). Коэффициент вариации усредненных диаметров и V_{cp} (11,68 и 11,94 %) также находятся в пределах средних значений. Коэффициент вариации площади разлива (S_e , m^2), рассчитанный по V_{cp} , находится в пределах 24,03 %, что свидетельствует о высоком рассеивании результатов эксперимента. На наш взгляд, форма и размер площади разлива зависит не только от влагопроницаемости почвы, но и от сил поверхностного натяжения навоза, которые также до сих пор недостаточно исследованы.

Время полного впитывания жидкой фракции навоза в почву также сильно расходится по точкам внесения ($v=84,72\%$). По схеме внесения навоза (см. рисунок) точки 16-20 и 24-27 находятся в правом восточном углу участка, причем на границе с не оттаявшим снежным покровом. На основе осеннего, зимнего и весеннего накопления влаги в почве экспериментально было установлено, что в замерзшей почве её влажность практически не изменяется, низкая скорость ее впитывания объясняется именно присутствием мерзлоты на глубине и текущим (за прошедшую ночь) замерзшим слоем на поверхности [6].

Таблица 1 – Опытные данные внесения жидкой фракции навоза

№ точек п/п	b_{min} , см	b_{max} , см	b_{cp} , м	$V_{cp} = d_{экв}$, м	Площадь, S_e , м ²	Время впитывания, Т, с	Относительная влагопроницаемость, δ , кг/м ² с
1	2	3	4	5	6	7	8
1	53	83	0,67	0,663	0,345227	27	1,073
2	71	90	0,805	0,799	0,501384	16	1,247
3	65	87	0,765	0,752	0,444133	44	0,512
4	57	79	0,68	0,671	0,353608	37	0,764
5	71	82	0,765	0,763	0,457221	83	0,264
6	60	62	0,61	0,61	0,292238	41	0,834
7	53	67	0,6	0,596	0,278978	70	0,512
8	66	88	0,77	0,762	0,456023	97	0,226
9	53	85	0,69	0,671	0,353608	45	0,628
10	64	71	0,675	0,674	0,356777	30	0,9342
11	52	89	0,705	0,680	0,363157	33	0,834
12	54	58	0,56	0,560	0,246294	47	0,864
13	63	80	0,715	0,710	0,395908	35	0,722
14	75	93	0,82	0,835	0,547583	65	0,281
15	50	69	0,595	0,587	0,270616	57	0,648
16	57	79	0,68	0,671	0,353608	90	0,314
17	60	76	0,68	0,688	0,371753	130	0,207
18	49	63	0,56	0,556	0,242788	121	0,34
19	60	69	0,645	0,643	0,324713	215	0,143
20	55	67	0,61	0,607	0,289371	261	0,101
21	63	77	0,70	0,696	0,380448	57	0,461
22	81	87	0,84	0,839	0,552842	42	0,431
23	57	86	0,715	0,704	0,389244	45	0,571
24	47	72	0,595	0,582	0,266025	220	0,171
25	49	69	0,59	0,581	0,265112	290	0,13
26	62	87	0,745	0,734	0,423125	165	0,143
X_{cp}	59,5	77,5	0,684038	0,678231	0,366222	90,88462	0,514
σ	8,50999	9,88433	0,079913	0,08098	0,088099	76,9625	0,32115
v , %	14,3	12,75	11,68	11,94	24,03	84,72	62,52

Даже максимальное время впитывания (261 с на точке 20) не является препятствием для внесения жидкой фракции навоза разливом по подмерзшей почве, поскольку представляется маловероятным, что за этот период времени произойдет утечка компонентов навоза в атмосферу. Как правило, при утреннем внесении и наличии дневной оттепели происходит распределение жидкой фракции уже в оттаявшей почве. При повторном замерзании возможна также незначительная утечка компонентов в атмосферу (эффект сублимации).

Относительный показатель проницаемости жидкой фракции навоза в мерзлую почву по точкам очень сильно отличается от 0,101 (точка 20) до 1,247 (точка 2) при среднем значении 0,514 кг/м²с.

В точках 1, 2 и 10 наблюдалось повышенное впитывание жидкой фракции навоза в почву, резко отличающееся от среднего значения. Очевидно, что в этих точках были трещины (или сеть трещин) в текущем замерзшем поверхностном слое почвы, которые перед разливом остались незамеченными. После впитывания трещины слились с поверхностью почвы в одно целое.

Используя относительный показатель влагопроницаемости, мы можем более точно определить наличие мерзлоты на глубине. Так, в точках 8, 14 и 20 осталась полоса мерзлой почвы. В точках 16-19 и 24-26, приграничных снежному покрову, расположенных по всей восточной стороне участка, имеется подпочвенная площадка (массив) не оттаявшей мерзлоты. Точка 5, отличающаяся низкой влагопроницаемостью (0,264 кг/м²с), вероятно находится над локальным участком подпочвенной мерзлоты.

Ранжирование ряда относительной влагопроницаемости δ , кг/м²с показывает наличие трех групп показателей:

- 1) низкая влагопроницаемость (наличие подпочвенной мерзлоты): 0,101; 0,130; 0,143; 0,143; 0,171; 0,207; 0,226; 0,264; 0,281; 0,314; 0,340;
- 2) средняя влагопроницаемость: 0,431; 0,461; 0,512; 0,512; 0,571; 0,628; 0,648; 0,722; 0,764;
- 3) высокая влагопроницаемость (наличие визуально не замеченных трещин на поверхности): 0,834; 0,834; 0,864; 0,934; 1,073; 1,247.

Проверка минимального и максимального значения ряда была проведена по τ с использованием таблицы критических крайних значений:

$$\tau_n = (X_2 - X_1) / (X_{n-1} - X_1) \text{ (для оценки } X_1),$$

$$\tau_e = (X_n - X_{n-1}) / (X_n - X_2) \text{ (для оценки } X_n).$$

Таблица 2 – Результаты проверки значений сгруппированных показателей

№	Наименование ряда	n, шт	τ_n	τ_e	$\tau_{\text{табл}}$		Соответствие ряду (+/-)
					P _{0,95}	P _{0,99}	
1	Низкая влагопроницаемость	11	0,121	0,108	0,450	0,566	+
2	Средняя влагопроницаемость	9	0,09	0,126	0,512	0,635	+
3	Высокая влагопроницаемость	6	0,073	0,421	0,689	0,805	+

Согласно результатам, приведенным в таблице 2, значения рядов низкой, средней и высокой влагопроницаемости вполне могут быть использованы на практике.

Контрольные проезды трактора Т-25А по участку во время эксперимента показали стабильную несущую способность подмерзшей почвы. При повторном проезде в 10.30 рядом с точками 1-3 наблюдалось продавливание почвы до глубины 3,5 см по следу протектора заднего колеса, что является косвенным показателем возможных трещин в поверхностном, перманентно замерзающем слое.

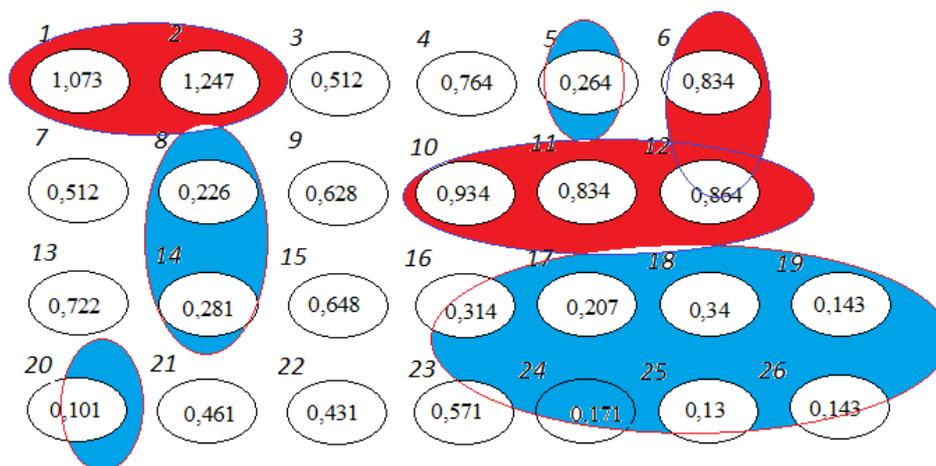


Рис. Полигон размещения точек и распределения участков по влагопроницаемости.

Выводы.

1. Суточное перманентное замерзание поверхностного почвенного слоя не является препятствием для проникновения жидкой фракции навоза вглубь почвенного пласта. При этом слой обладает достаточной прочностью и несущей способностью для механизированного внесения жидкой фракции навоза разливом по поверхности поля.

2. В качестве критерия для оценки влагопроницаемости жидкой фракции навоза в мерзлую почву (δ , кг/м²) принято частное массы жидкой фракции m (кг) к площади S_e (м²) и времени впитывания T , (с), поскольку ни площадь разлива, ни время полного впитывания не являются количественными показателями для точной оценки процесса. По принятому показателю определены участки с наличием подпочвенной не оттаявшей мерзлоты.

Литература

1. Глушко, К.А. Развитие концептуальных подходов к изучению процесса инфильтрации талых вод сквозь мерзлую почву / К. А.Глушко, Н. Н.Водичи, С. С. Стельмашук // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 18-21.

2. Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения Чувашской Республики / Т. А. Ильина [и др.]. – Чебоксары: Полиграфический отдел ФГОУ ВПО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия», 2005. – 123 с.

3. Проблемы и перспектива агропромышленного производства: монография / под ред. Л. Б. Винничек, А. А. Галлиулиной. – Пенза: РИО ГСХА, 2014. – 220 с.

4. Проблемы и перспективы развития АПК и сельских территорий: монография / С. С. Чернова [и др.]. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2015. – 170 с.

5. Смирнов, П.А. Вариант реконструкции свиарников-откормочников по типовому проекту 802-5-15 // Биологические и экологические проблемы земледелия Поволжья: материалы Всероссийской научно - практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора А. И. Кузнецова. – Чебоксары: ООО «Полиграфъ», 2010. – С. 236-240.
6. Смирнов, П.А. Некоторые результаты исследования влажности почвы в осенне-зимне-весенний период / П. А. Смирнов, И. И. Максимов // Труды Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – Чебоксары, 2005. – Т. XX. – С. 252-255.
7. Смирнов, П.А. Сбор и удаление жидкой фракции навоза из коровника в условиях мелкотоварного производства / П.А. Смирнов, Е. В. Прокопьева // Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков: материалы XVII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2016. – С. 49-53.
8. Чалова, О.В. Водопроницаемость мерзлых черноземов обыкновенных и светло-каштановых почв Нижнего Поволжья под влиянием карбоната калия / О. В. Чалова // Лесотехнический журнал. –2014. – № 2. – С. 105-109.

Сведения об авторах

1. **Смирнов Петр Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно – технологических машин и комплексов, Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, e-mail: smirnov_p_a@mail.ru, тел. 89603101909;
2. **Федоров Дмитрий Юрьевич**, магистрант инженерного факультета, Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, e-mail: ddiimmaann35@mail.ru, тел. 89196613455;
3. **Прокопьева Елена Владимировна**, магистрант инженерного факультета, Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, e-mail: elena-prokory@mail.ru, тел. 89279930981.

PREREQUISITES AND SUBSTANTIATION OF THE EARLY HAZARDOUS EXTRACTION OF THE LIQUID MANURE IN THE CONDITIONS OF SMALL-ESTATE PRODUCTION

Smirnov P.A., Fedorov D.Yu., Prokopieva E.V.
Chuvash State Agricultural Academ
 428000, Cheboksary, Russian Federation

Brief abstract: Daily freezing of the surface soil layer is not an obstacle to the penetration of the liquid fraction of manure deep into the soil layer. In this case, this layer has sufficient strength and bearing capacity for mechanized application of the liquid fraction of manure by spilling over the surface of the field. As a criterion for estimating the moisture permeability of the liquid fraction of manure to the frozen soil (δ , kg / m² s), the private mass of the liquid fraction m (kg) is taken to the area S_e (m²) and the absorption time T , (s). According to the accepted indicator sites with the presence of subsoil permafrost were determined. The freezing of the surface soil layer is not an obstacle for the penetration of the liquid fraction of manure into the depth of the soil layer. In this case, this layer has sufficient strength and bearing capacity for mechanized application of the liquid fraction of manure by spilling over the surface of the field. As a criterion for estimating the moisture permeability of the liquid fraction of manure to the frozen soil (δ , kg / m² s), the private mass of the liquid fraction m (kg) is taken to the area S_e (m²) and the absorption time T , (s). According to the accepted indicator sites with presence of subsoil not thawed frozen ground are defined.

Key words: unfiltered manure, manure application, moisture permeability index.

References

1. Problems and prospects for the development of agro-industrial complex and rural areas: monograph / Under total. Ed. S.S. Chernov. - Novosibirsk: Publisher CRNS, 2015. - 170 p.
2. Problems and prospects of agro-industrial production: monograph / Under total. Ed. L.B. Vinnichek, A.A. Galliulina-Penza: RIO GSAA, 2014. -220 p.
3. Smirnov, P.A. Collection and removal of the liquid fraction of manure from the barn in small-scale production / P.A. Smirnov, E.V. Prokopyev // Agricultural sciences and agro-industrial complex at the turn of the century: a collection of materials of the XVII International Scientific and Practical Conference / Under total. Ed. S.S. Chernov. - Novosibirsk: Publisher CRNS, 2016. - Pp. 49-53.
4. Chalova, O.V. Water permeability of frozen chernozems of ordinary and light chestnut soils of the Lower Volga region under the influence of potassium carbonate / O.V. Chalova // Lesotekhnicheskyy journal-Voronezh, -2014.- №2. –Pp.105-109.

5. Glushko, K.A. Development of conceptual approaches to studying the process of infiltration of thawed waters through frozen soil / Glushko KA, Vodchits NN, Stelmashuk SS // Bulletin of Brest State Technical University, 2013.- №2. –Pp.18-21.
6. Smirnov, P.A. The variant of reconstruction of pigsties-fatteners according to the standard project 802-5-15 / Biological and ecological problems of land-division of the Volga region: Mat. All-Russ. sci. -pract. conf., dedicated to 80 years from the day of birth. prof. Kuznetsov A.I. -Cheboksary: OOO "Polygraph", 2010.-Pp. 236-240.
7. Smirnov, P.A. Some results of the study of soil moisture in the autumn-winter-spring period / P.A. Smirnov, I.I. Maksimov // Proceedings of ChSAA, -t.XX.- Cheboksary, 2005.-Pp.252-255.
8. Monitoring of agricultural land of the Chuvash Republic. - Cheboksary: Printing department of the Chuvash State Agricultural Academy, 2005. - 123 p.

Information about the authors

1. **Smirnov Pyotr Alekseyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technology Machines and Complexes, Chuvash State Agricultural Academy, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, 29, K. Marks Str.; e-mail: smirnov_p_a@mail.ru, Phone: 89603101909;
2. **Fedorov Dmitry Yurievich**, Magister of Engineering Faculty, Chuvash State Agricultural Academy, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, 29, K. Marks Str.; e-mail: ddiimmaann35@mail.ru, Phone: 89196613455;
3. **Prokopyeva Elena Vladimirovna**, Magister of Engineering Faculty, Chuvash State Agricultural Academy, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, 29, K. Marks Str.; e-mail: elena-prokopy@mail.ru, Phone: 89279930981.

УДК 621.382

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.В. Степанов¹⁾, А.И. Белов²⁾, Е.В. Окулич²⁾, Р.А. Шуйский²⁾, Д.С. Королев²⁾, А.Н. Михайлов²⁾

¹⁾ Чувашская государственная сельскохозяйственная академия

428003, Чебоксары, Российская Федерация

²⁾ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация

Исследование поддержано РФФИ в рамках проекта №18-37-00456.

Аннотация. Среди наиболее интенсивно развивающихся, «прорывных» направлений в области информационных технологий – разработка нейроморфных систем, которые по своей архитектуре и функциональным возможностям подобны мозгу. Создание таких систем означает качественный скачок в развитии технологий, актуальный для самых разнообразных сфер применения в быту и на производстве, в том числе и для сельского хозяйства. Одним из эффективных путей аппаратной реализации данной задачи является создание мемристоров – устройств компьютерной памяти на основе тонкопленочных структур (RRAM), изменяющих свое электросопротивление (испытывающих переключение) под действием электрического поля или протекающего тока. Наряду с несомненными достоинствами, мемристормы имеют существенный недостаток, тормозящий их коммерциализацию – большой разброс параметров и низкую воспроизводимость рабочих характеристик. Для мемристивных структур типа металл–диэлектрик–металл это в основном связано со случайным характером формирования ключевых элементов таких структур – филаментов.

В данной работе предложено управлять процессом формирования филаментов путем облучения поверхности диэлектрика ускоренными ионами. Последние создают в диэлектрике обогащенные дефектами области («каскады смещения»), в которых зарождаются филаменты. На примере облучения ионами Xe^+ (с энергией 5 кэВ) поверхности диэлектрика в мемристивной структуре $\text{Au/SiO}_2/\text{TiN}$ установлено, что облучение позволяет снизить разброс напряжения, необходимого для формирования филаментов, уменьшить вариацию вольтамперных характеристик при повторных циклах переключения, а также увеличить отношение токов в высокоомном и низкоомном состояниях мемристора. Предложено объяснение указанного эффекта. Таким образом, эксперимент указывает на перспективность данного способа управления параметрами мемристора.

Ключевые слова: мемристор, оксид кремния, ионное облучение, влияние на рабочие характеристики.

Введение. Исследования, которым посвящена данная публикация, носят междисциплинарный характер и актуальны для многих областей науки и техники.

Одно из авангардных направлений, находящихся на стыке биологии, медицины, компьютерной техники и робототехники, – разработка нейроморфных электронных систем [8], которые по своей архитектуре и функциональным возможностям подобны живой нервной системе и мозгу. Целью этого направления является