

## Влияние различных типов поверхностно-активных веществ на эмиссию газов и микробиоту жидкой фракции навозных стоков

© 2023. Л. В. Пилип<sup>1</sup>, к. в. н., доцент, Н. В. Сырчина<sup>2</sup>, к. х. н., доцент, с. н. с.,  
 Е. П. Колеватых<sup>3</sup>, к. м. н., доцент, зав. кафедрой, В. В. Рутман<sup>2</sup>, м. н. с.,  
<sup>1</sup>Вятский государственный агротехнологический университет,  
 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,  
<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
<sup>3</sup>Кировский государственный медицинский университет,  
 610000, Россия, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112,  
 e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip\_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Разнообразные поверхностно-активные вещества (ПАВ) находят широкое применение в практике современного промышленного животноводства. В составе моющих средств и фармакологических ветеринарных препаратов ПАВ неизбежно попадают в навозные стоки (НС), что приводит к изменению свойств последних. Изучение влияния различных типов ПАВ на газовыделение и микробиоту жидкой фракции (ЖФ) НС выполняли на примере ПАВ с различной биоцидной активностью: лауретсульфата натрия – анионоактивное ПАВ (АПАВ), оксида лаурилдиметиламина – неионогенное ПАВ (НПАВ) и бензалкония хлорида – катионоактивное ПАВ (КПАВ). Исследования проводили в лабораторных условиях. Общее время наблюдений с момента внесения добавок в ЖФ (0,01 г на 1 л) составило 14 суток. Полученные результаты показали, что под влиянием ПАВ изменяется динамика выделения парниковых газов (CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>) и запахообразующих веществ (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, меркаптанов), а также состав микробиоты биоплёнок и бактериопланктона. Динамика выделения CH<sub>4</sub> отличается от динамики выделения других газов. Применение КПАВ приводит к постепенному увеличению эмиссии CH<sub>4</sub> через неделю после внесения, что может быть связано с повышением проницаемости цитоплазматических мембран метаногенных архей, отличающихся повышенной устойчивостью к воздействию химических веществ. Внесение в ЖФ различных типов ПАВ оказывает различное влияние на динамику выделения запахообразующих веществ, при этом период активной эмиссии меркаптанов становится более продолжительным. В варианте эксперимента с добавкой НПАВ наблюдалось наиболее высокое содержание этилмеркаптана. Существенных различий в воздействии низких концентраций различных ПАВ на микробиоту ЖФ выявлено не было, однако по комплексу показателей добавка АПАВ оказала более выраженное бактериостатическое воздействие. Наиболее толерантными к воздействию всех типов ПАВ оказались кластридии, занимающие доминирующее положение в составе микробиоты биоплёнок и бактериопланктона. Второе место по численности в биоплёнках ЖФ занимали грибы.

**Ключевые слова:** навозные стоки, поверхностно-активные вещества, микробиота, биоплёнки, бактериопланктон, эмиссия парниковых газов, запах.

## Influence of various types of surfactants on gas emissions and microbiota of the liquid fraction of manure effluents

© 2023. L. V. Pilip<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9695-7146, N. V. Syrchina<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8049-6760,  
 E. P. Kolevatykh<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-6147-3555, V. V. Rutman<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-9025-3487,  
<sup>1</sup>Vyatka State Agrotechnological University,  
 133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,  
<sup>2</sup>Vyatka State University,  
 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
<sup>3</sup>Kirov State Medical University,  
 112, Karla Marksa St., Kirov, Russia, 610000,  
 e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip\_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Various surfactants are widely used in modern industrial animal husbandry. As part of detergents and pharmaceutical veterinary preparations, surfactants inevitably fall into manure effluents (ME), resulting in a change in the

properties of ME. The study of the effect of various types of surfactants on the gas release and microbiota of the liquid fraction (LF) of ME was carried out on the example of surfactants with different biocidal activity: sodium laureth sulfate – anionactive surfactant (AS), lauryldimethylamine oxide – nonionic surfactant (NS) and benzalkonium chloride – cationic surfactant (CS). The studies were conducted under laboratory conditions. The total observation time since the introduction of additives in the LF (0,01 g per 1 liter) was 14 days. The obtained data shows changes in the dynamics of greenhouse gases (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>) and odor-forming substances (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, RSH) emission, as well as in the composition of the microbiota of biofilms and bacterioplankton, under the influence of surfactants. The dynamics of the CH<sub>4</sub> emission differ from those of other gases. The use of CS leads to a gradual increase in CH<sub>4</sub> emission a week after application. This may be due to increased permeability of the cytoplasmic membranes of methanogenic archaea with increased chemical resistance. The application of various types of surfactants into the LF has different effects on the dynamics of the odor-forming substances emission, and the active emission period of mercaptans becomes longer. The highest level of ethyl mercaptan was observed in the option with NS. There was no significant difference in the effect of low concentrations of various surfactants on the microbiota of LF, however the AS has a more pronounced bacteriostatic effect on set of indicators. The most tolerant to the effects of all types of surfactants were Clostridia, which dominates the microbiota biofilms and bacterioplankton. Fungi were the second most abundant in biofilms of the LF.

**Keywords:** manure effluents, surfactants, microbiota, biofilms, bacterioplankton, greenhouse gas emission, odor.

Для современного промышленного животноводства характерно широкое использование разнообразных поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые входят в состав очищающих и дезинфицирующих средств, фармакологических препаратов, кормовых добавок, композиций для подавления неприятного запаха [1]. После использования основная доля соответствующих материалов попадает в навозные стоки (НС). Наличие ПАВ приводит к изменению поверхностных свойств жидких гетерогенных систем, трансформации характерной для НС микробиоты, выраженным солюбилизирующему и эмульгирующему эффектам, затрудняющим разделение НС на жидкую и твердую фракции. Следствием снижения поверхностного натяжения на границе НС/воздух становится повышенная эмиссия газообразных веществ, образующихся в результате микробиологической деструкции органических соединений. При минерализации органических компонентов навоза в атмосферный воздух поступают как парниковые газы (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O), так и разнообразные запахообразующие вещества (ЗОВ), оказывающие негативное влияние на экологическую обстановку вблизи животноводческих комплексов [2–4]. Состав и количество выделяемых из НС газов зависят от качественного и количественного состава микробиоты [5, 6]. Под влиянием различных типов ПАВ активность микроорганизмов-аммонификаторов может как увеличиваться, так и снижаться. Катионактивные ПАВ (КПАВ) проявляют выраженные бактерицидные свойства [7–9]. Аналогичные свойства характерны и для амфифильных ПАВ, что позволяет использовать их в качестве дезинфицирующих средств [10]. Неионогенные ПАВ (НПАВ) могут оказывать как стимулирующее влияние на активность микроорганизмов (МО) [11, 12], так и пода-

влять их жизнедеятельность [13] или снижать возможность формирования биоплёнок [14]. Влияние аниоактивных ПАВ (АПАВ) на микробиоту также неоднозначно [15]. Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что загрязнение сточных вод этим типом сурфактантов с одной стороны оказывает ингибирующее воздействие на процессы биологической очистки, но с другой АПАВ могут подвергаться биоразложению, которое наиболее успешно идет в аэробных условиях [16]. Механизм биоцидного действия ПАВ обычно связывают с нарушением проницаемости и дезорганизацией цитоплазматических (внутренних) мембран, а также снижением активности связанных с мембранами клеточных ферментов [17, 18].

Следует отметить, что НС являются сложным объектом для проведения исследований (многокомпонентный, гетерогенный, не стабильный во времени состав, наличие патогенной и условно-патогенной микробиоты, неприятный запах). Очевидно, именно поэтому в опубликованных источниках очень мало данных, характеризующих влияние различных ПАВ на процессы газовой выделенной и микробиоту побочных продуктов животноводства.

Цель настоящей работы состояла в изучении влияния различных типов ПАВ на эмиссию парниковых газов и запахообразующих веществ, а также микробиоту жидкой фракции навозных стоков свиноводческого предприятия.

### Объекты и методы исследования

Для проведения исследований использовали жидкую фракцию (ЖФ) свиных НС, предоставленную одним из крупных свиноводческих предприятий Кировской облас-

ти. Жидкая фракция представляла собой продукт сепарирования удаляемых из навозонакопительных ванн стоков. Время от начала заполнения ванн до удаления НС составляло 10 суток. Пробы ЖФ отбирали в стерильные ёмкости непосредственно после сепарирования НС и сразу доставляли в специализированные лаборатории для проведения химических и микробиологических исследований.

Изучение влияния различных типов ПАВ на газовыделение и микробиоту выполняли на примере ПАВ с разной биоцидной активностью: лауретсульфата натрия – АПАВ, оксида лаурилдиметиламина – НПАВ и бензалкония хлорида – КПАВ. Лауретсульфат натрия относится к современным детергентам с низкой токсичностью, широко используется в моющих и косметических средствах в качестве стабилизатора, эмульгатора, солюбилизатора [19]. Бензалкония хлорид проявляет выраженные биоцидные свойства, применяется как средство для подавления бактериальных, грибных и вирусных инфекций [20]. Оксид лаурилдиметиламина (оксид лаурамина) является одним из представителей группы оксидов алкилдиметиламина, отличающихся низкой токсичностью и выраженной антимикробной активностью в отношении различных МО, повышает стабильность пен и вязкость растворов [21, 22].

Образцы ЖФ объёмом 4 л помещали в пластиковые пятилитровые ёмкости, вносили добавки ПАВ согласно вариантам эксперимента, перемешивали, закрывали крышками и выдерживали на протяжении всего периода наблюдений в затемнённом помещении при температуре  $20 \pm 2$  °С. Варианты эксперимента: контроль – ЖФ без добавок; вариант 1 – ЖФ + КПАВ; вариант 2 – ЖФ + НПАВ; вариант 3 – ЖФ + АПАВ. Все добавки вносили в виде водных растворов в дозировке 0,01 г на 1 л ЖФ (в расчёте на безводную форму ПАВ). Анализ состава выделяющихся газов (парниковые:  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ ; запахообразующие:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{R-SH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$ ) проводили с интервалом 1–3 сут с помощью газоанализатора ГАНК-4.

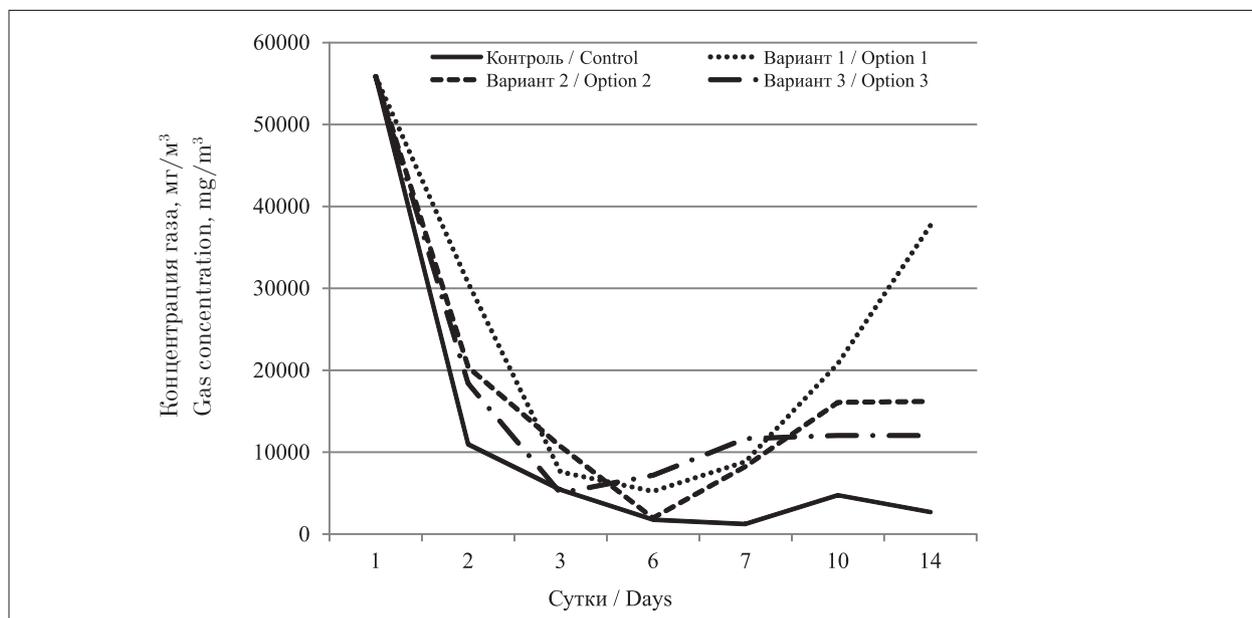
Общее время наблюдений с момента внесения добавок составило 14 суток. Для выполнения микробиологических исследований использовали пробы сформировавшихся на поверхности ЖФ биоплёнок и пробы бактериопланктона (забор осуществляли с глубины 12–15 см от поверхности). Пробы биоматериала для микробиологических исследований отбирали, соблюдая правила асептики и анти-

септики, перед внесением добавок, а также в конце эксперимента (через 14 суток после внесения ПАВ) и доставляли в микробиологическую лабораторию в течение 1 часа. После ряда серийных десятикратных разведений материал высевали на питательные среды: ЭНДО, Левина, Плоскирева (для определения бактерий группы кишечной палочки), желточно-солевой агар (для стафилококков), мясо-пептонный агар (для сарцин), «Клебсиелла 5-АСК» (для клебсиелл), ЦПХ-агар (для псевдомонад), Блаурокка (для бифидобактерий), MRS-агар (для лактобактерий), АнаАэроагар, HiMedia, Индия (для анаэробных бактерий), Сабуро (для дрожжей), Pitt-агар, HiMedia, Индия (для аспергиллов). Для создания анаэробноаэробии применяли микроанаэроаэрозат (OXOID, Великобритания) и газогенерирующие пакеты (ООО «Новые технологии», Россия). Инкубировали при температуре 37 °С в течение 24–72 ч. Общее количество микробов в 1 мл (КОЕ/мл) устанавливали методом поверхностного посева на питательные среды (ОФС.1.7.2.0008.15 Определение концентрации микробных клеток // МЗ РФ от 31.10.2018 № 749). Идентификацию МО проводили по биохимическим признакам при постановке АНАЭРОтеста23, ЭНТЕРОтеста24N, СТАФИИтеста16, СТРЕПТОтеста16, КАНДИДА-теста21 (Erba Lachema, Чехия), АР120СНL, АР150СНL (bioMerieux, Франция) и антигенным свойствам в реакции агглютинации с использованием диагностических родо- и видоспецифических агглютинирующих сывороток (ООО «РЕАГЕНТ», Россия).

Все исследования проводили в трёхкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов выполняли стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Microsoft Excel. Статистическую значимость различий средних величин оценивали по *t*-критерию Стьюдента. Стандартное отклонение в каждой серии измерений не превышало 12%.

### Результаты и обсуждение

В результате исследований было установлено, что внесение в ЖФ небольших добавок ПАВ (0,01 г/л) приводит к существенному влиянию как на количество выделяющихся газов (ВГ), так и на состав микробиоты. Динамика выделения  $\text{CH}_4$  значительно отличается от динамики выделения других газов, что может быть обусловлено специфичным составом анаэробной метаногенной микробиоты, об-



**Рис. 1.** Динамика выделения CH<sub>4</sub> из жидкой фракции навозных стоков. Здесь и далее: контроль – жидкая фракция (ЖФ) без добавок; вариант 1 – ЖФ + катионактивное поверхностно-активное вещество (ПАВ); вариант 2 – ЖФ + неионогенное ПАВ; вариант 3 – ЖФ + анионактивное ПАВ  
**Fig. 1.** Dynamics of CH<sub>4</sub> emission from the liquid fraction of manure effluents. Here and below: control – liquid fraction (LF) without additives; option 1 – LF + cationic surfactant; variant 2 – LF + nonionic surfactant; option 3 – LF + anionic surfactant

разующей сложные синтрофные ассоциации между различными группами МО [23, 24]. На вторые-третьи сутки наблюдений выделение CH<sub>4</sub> во всех вариантах эксперимента, включая контроль, резко снизилось (рис. 1). Скорее всего данный эффект обусловлен насыщением ЖФ кислородом при наполнении ёмкостей.

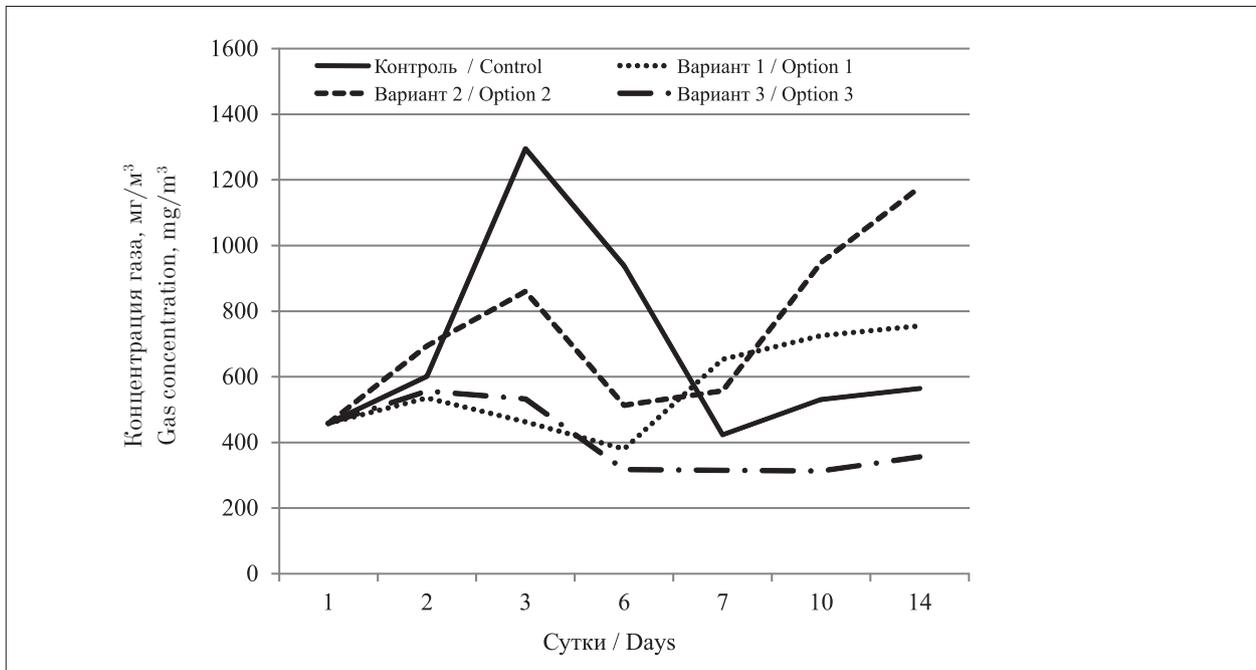
На протяжении всего периода наблюдений во всех вариантах содержание метана в выделяемых газах (ВГ) находилось на более низком уровне, чем в начале эксперимента, что можно объяснить регулярным поступлением кислорода в экспериментальные ёмкости во время измерения состава газов. В вариантах с добавками ПАВ концентрация CH<sub>4</sub> была несколько выше, чем в контроле. Особенно отчётливо данная тенденция проявилась к концу периода наблюдений в варианте 1 (различия между вариантом 1 с добавкой КПАВ и остальными вариантами на 14-е сутки статистически значимы). Метаногенные археи, играющие ключевую роль в синтезе CH<sub>4</sub>, проявляют повышенную устойчивость к действию ПАВ, включая КПАВ, что обусловлено спецификой строения мембран этой группы МО. Мембраны архей характеризуются меньшей проницаемостью по отношению к компонентам внешней среды [25]. Возможно сурфактанты не приво-

дят к существенному повреждению клеточных мембран архей, но способствуют повышению их проницаемости, за счёт чего активизируется метаболизм и выделение CH<sub>4</sub>.

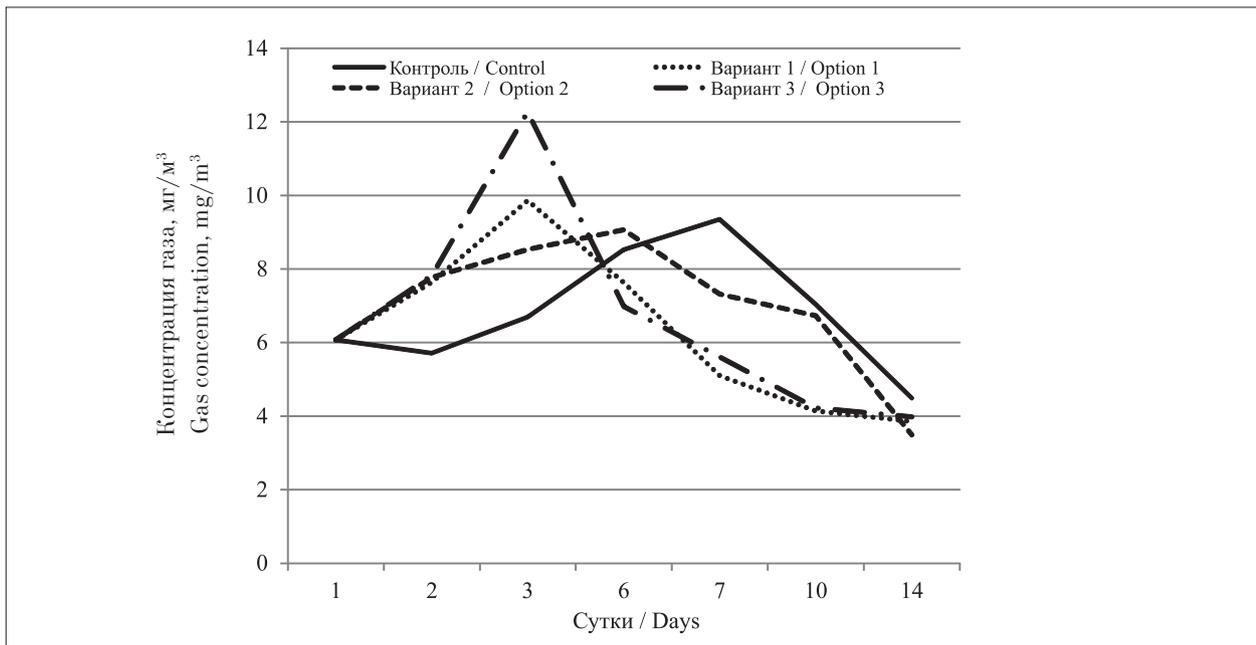
Динамика выделения CO<sub>2</sub> из ЖФ существенно отличалась от динамики выделения CH<sub>4</sub> (рис. 2).

Во всех вариантах на протяжении первых двух суток наблюдалось увеличение эмиссии углекислого газа с последующим снижением на 6–7 сут, а затем некоторым ростом этого показателя к концу эксперимента. Эмиссия CO<sub>2</sub> в вариантах с добавками ПАВ на протяжении первых шести суток наблюдений была ниже, чем в контроле, что можно объяснить неблагоприятным воздействием сурфактантов на клеточные мембраны прокариот, метаболизирующих органические вещества, а также депрессией метаногенеза в первой половине периода наблюдений. Известно, что большинство метаногенов для синтеза CH<sub>4</sub> используют CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub> + 4H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O [26].

К наиболее значительному снижению содержания CO<sub>2</sub> в ВГ на протяжении всего эксперимента привела добавка АПАВ. Неионогенное ПАВ оказало наименьшее влияние на данный показатель, причём на 14-е сутки содержание CO<sub>2</sub> в ВГ в варианте 2 было в 2 раза выше, чем в контроле (различия статистиче-



**Рис. 2.** Динамика выделения CO<sub>2</sub> из жидкой фракции навозных стоков  
**Fig. 2.** Dynamics of CO<sub>2</sub> emission from the liquid fraction of manure effluents



**Рис. 3.** Динамика выделения NH<sub>3</sub> из жидкой фракции навозных стоков  
**Fig. 3.** Dynamics of NH<sub>3</sub> emission from the liquid fraction of manure effluents

ски значимо). На поверхности ЖФ с добавкой НПАВ к 14-м суткам сформировалась самая плотная биоплёнка.

Известно, что аэробная гетеротрофная микробиота биоплёнок принимает активное участие в окислении органических соединений с выделением CO<sub>2</sub> [27, 28]. Условия эксперимента (ограниченное освещение и высокое содержание органических веществ в

ЖФ) способствовали развитию гетеротрофных МО. В отличие от парниковых газов, динамика выделения различных ЗОВ во всех вариантах эксперимента имела некоторые общие закономерности: рост эмиссии в первые дни наблюдений и постепенное снижение этого показателя к концу эксперимента. В контрольном варианте максимальное содержание NH<sub>3</sub> в выделяемых из ЖФ газах отмечено

на 7-е сутки, в вариантах с добавками КПАВ и АПАВ – на третьи сутки (рис. 3).

Добавка НПАВ привела к некоторому сглаживанию пика эмиссии  $\text{NH}_3$ . Возможно соответствующий эффект обусловлен активным использованием  $\text{NH}_3$  в качестве источника азота в консорциумах МО плотных биоплёнок, характерных для варианта 2.

Обработка ЖФ сурфактантами способствовала существенному повышению эмиссии  $\text{H}_2\text{S}$  на 6-е сутки наблюдений по сравнению с контролем (рис. 4). Наиболее отчетливо этот эффект прослеживался в вариантах с добавками КПАВ и АПАВ. Во второй половине эксперимента наблюдалось резкое снижение эмиссии  $\text{H}_2\text{S}$  на фоне заметного роста эмиссии  $\text{CH}_4$ . Известно, что в анаэробных биохимических процессах, сопровождающихся образованием  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{S}$ , микробиота жёстко конкурирует за весьма ограниченные ресурсы водорода, что хорошо объясняет наблюдаемые закономерности.

Высокий уровень эмиссии тиолов (R-SH), важнейших компонентов неприятного запаха в контрольном варианте, наблюдался на протяжении первых трёх суток эксперимента (рис. 5). Затем этот показатель резко снижался и стабилизировался. В вариантах с добавками ПАВ содержание R-SH в ВГ в первой половине наблюдений было ниже, а во второй выше, чем в контроле, т. е. в присутствии ПАВ период активного выделения соответствующих ЗОВ становится более продолжительным.

Влияние НПАВ на общую эмиссию меркаптанов оказалось незначительным, однако этот сурфактант оказал стимулирующее действие на эмиссию этантиола, концентрация которого в варианте 3 была выше, чем в других вариантах (рис. 6).

Этантиол является одним из продуктов распада серосодержащих аминокислот в анаэробных условиях. Самое высокое содержание этилмеркаптана во 2 варианте (рис. 6) сопровождалось относительно низким содержанием  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CH}_4$  в ВГ (рис. 4).

Характер и интенсивность газовой выделения, наблюдающегося при микробиологической деструкции органогенных субстратов, определяются особенностями микробиологических консорциумов, складывающихся в соответствующих системах. Однозначно связать наличие и количество того или иного ЗОВ в ВГ с конкретным видом МО в сложных многокомпонентных микробиологических сообществах, в которых продукты метаболизма одних МО становятся питательной средой для других, практически невозможно.

Состав микробиоты биоплёнок и бактериопланктона свиных НС имеет определённые различия как в видовом, так и в количественном отношении. Под биоплёнкой понимается совокупность МО, расположенных на поверхности НС, под бактериопланктоном – МО, находящихся в объёме НС. В таблице 1 приведены данные, характеризующие влияние

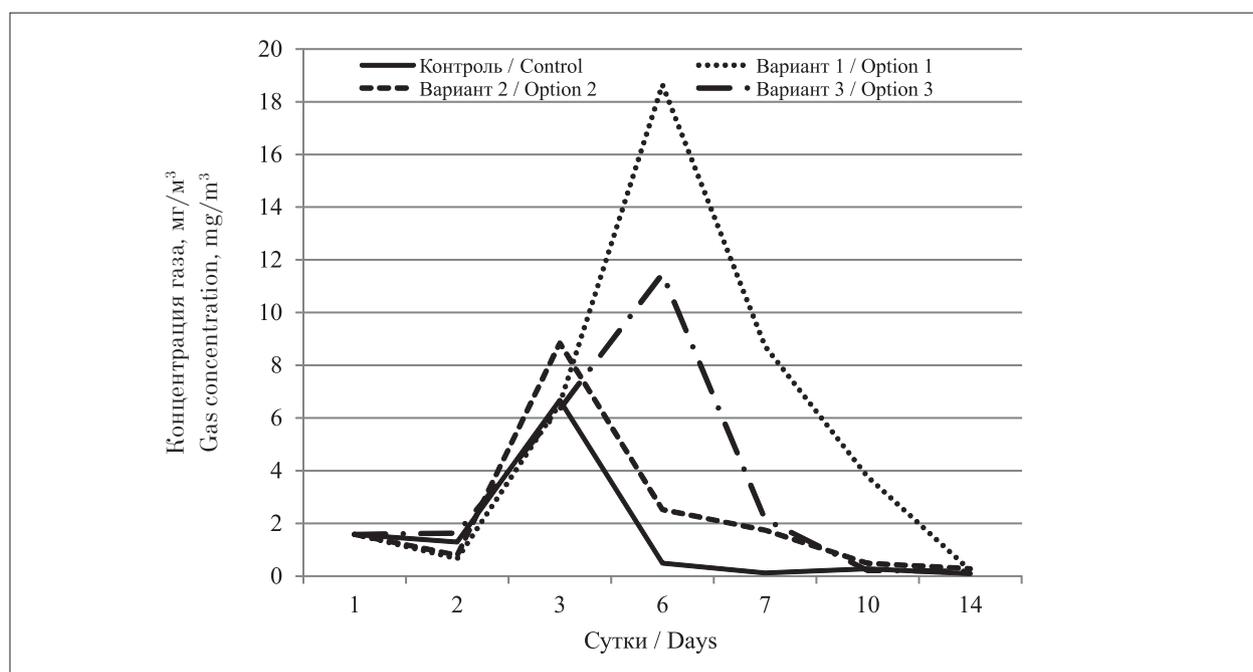


Рис. 4. Динамика выделения  $\text{H}_2\text{S}$  из жидкой фракции навозных стоков  
 Fig. 4. Dynamics of  $\text{H}_2\text{S}$  emission from the liquid fraction of manure effluents

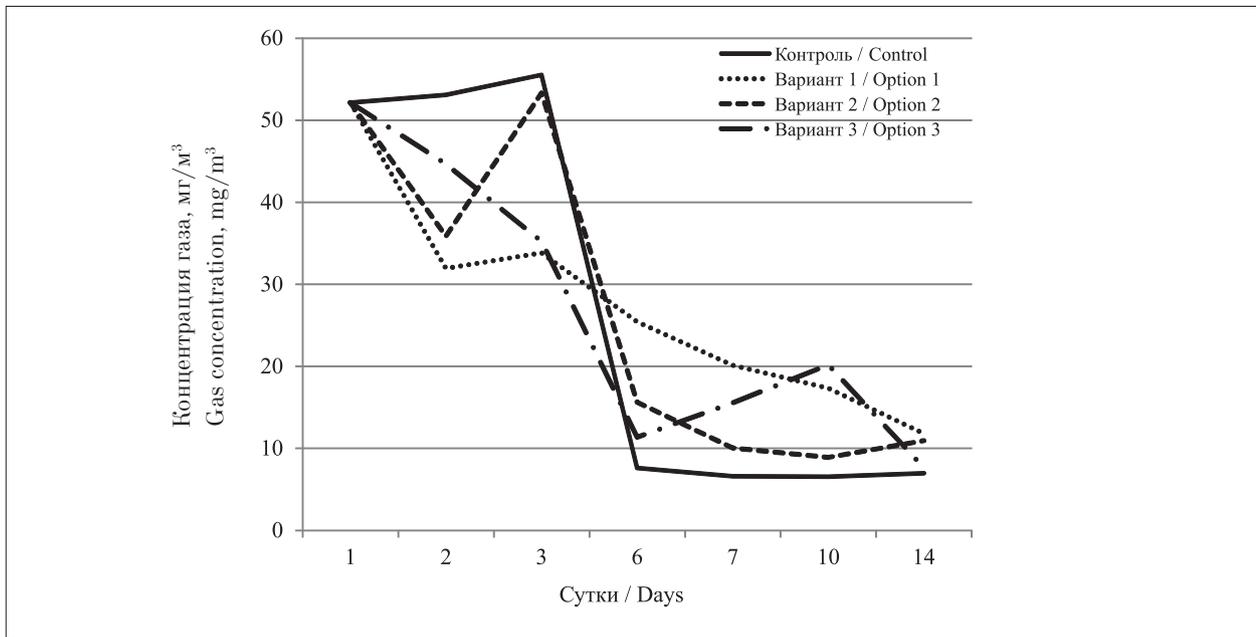


Рис. 5. Динамика выделения R-SH из жидкой фракции навозных стоков  
 Fig. 5. Dynamics of R-SH emission from the liquid fraction of manure effluents

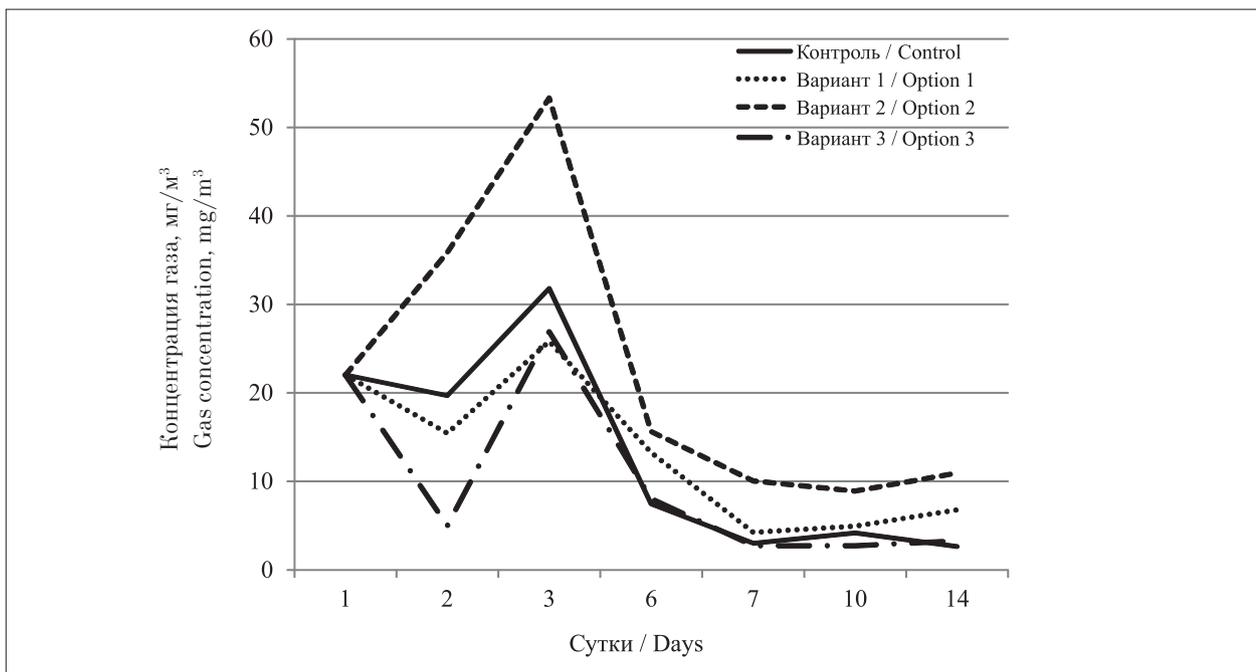


Рис. 6. Динамика выделения C₂H₅SH из жидкой фракции навозных стоков  
 Fig. 6. Dynamics of C₂H₅SH emission from the liquid fraction of manure effluents

различных ПАВ на состав микробиоты биоплёнок и бактериопланктона ЖФ.

В результате выполненных исследований установлено, что микробиоценоз биоплёнки ЖФ свиных НС весьма разнообразен и представлен облигатными анаэробными бактериями, грибами, факультативными анаэробными МО и аэробными бактериями (перечислены по мере убывания).

Внесение в ЖФ ПАВ способствовало снижению количества грамотрицательных факультативных анаэробов (*Escherichia coli*, *Proteus* spp.) и грамотрицательных облигатных анаэробов (*Prevotella* sp., *Fusobacterium* sp. и *Bacteroides* sp.) как в биоплёнках, так и в бактериопланктоне. Более выраженного бактерицидного действия КПАВ на грамотрицательные МО выявить не удалось.

Таблица 1 / Table 1  
Микробиоценоз ЖФ свиных навозных стоков, КОЕ/мл / Microbiocenosis of the LF of pig manure effluents, CFU/mL

Микроорганизмы Microorganisms	Варианты эксперимента / Options							
	контроль / control		вариант 1 / option 1		вариант 2 / option 2		вариант 3 / option 3	
	БПЛ / BF	БКП / ВР	БПЛ / ВФ	БКП / ВР	БПЛ / ВФ	БКП / ВР	БПЛ / ВФ	БКП / ВР
	Грамотрицательные факультативные анаэробы, КОЕ/мл / Gram-negative facultative anaerobes, CFU/mL							
<i>Escherichia coli</i>	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^4$	$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^4$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$
<i>Proteus</i> spp.	$(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(3,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 0,2) \cdot 10^4$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,5) \cdot 10^4$
<i>Klebsiella</i> sp.	$(4,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^4$	$(5,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^4$	$(4,0 \pm 0,6) \cdot 10^1$	$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$
	Грамположительные факультативные анаэробы / Gram-positive facultative anaerobes							
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^7$	–	–	–	–	–	–
<i>Lactobacillus</i> spp.	$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(5,0 \pm 0,8) \cdot 10^7$	–	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^7$	–	$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^7$	–	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^7$
	Грамотрицательные облигатные анаэробы, КОЕ/мл / Gram-negative obligate anaerobes, CFU / mL							
<i>Prevotella</i> sp.	$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,3) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^1$	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^1$	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$
<i>Bacteroides</i> sp.	$(3,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 1,3) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	–	$(6,0 \pm 1,1) \cdot 10^3$
<i>Fusobacterium</i> sp.	$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 1,1) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 1,3) \cdot 10^4$
	Грамположительные облигатные анаэробы, КОЕ/мл / Gram-positive obligate anaerobes, CFU/mL							
<i>Bifidobacterium</i> spp.	$(4,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^7$	–	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	–	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^6$	–	–
<i>Clostridium</i> spp.	$(8,6 \pm 0,4) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^7$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^7$	$(8,8 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(6,3 \pm 0,7) \cdot 10^7$	$(7,8 \pm 0,3) \cdot 10^5$	$(8,8 \pm 1,4) \cdot 10^7$
<i>Sarcina ventriculi</i>	–	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^6$	–	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^5$	–	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$	–	$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$
<i>Peptoniphilus asaccharolyticus</i>	–	$(8,0 \pm 1,3) \cdot 10^5$	–	$(6,0 \pm 1,1) \cdot 10^4$	–	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^2$	–	$(8,0 \pm 1,1) \cdot 10^2$
<i>Anaerococcus prevotii</i>	–	$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^2$	–	$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	–	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^1$	–	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^1$
	Грамотрицательные аэробы, КОЕ/мл / Gram-negative aerobes, CFU/mL							
<i>Pseudomonas</i> spp.	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(3,0 \pm 0,9) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^1$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,4) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	–	$(8,0 \pm 1,4) \cdot 10^2$
	Грибы, КОЕ/мл / Fungi, CFU/mL							
<i>Candida</i> sp.	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,9) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^4$
<i>Aspergillus</i> spp.	$(2,0 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(3,0 \pm 0,8) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$

Примечание: БПЛ – биоплёнка; БКП – бактериопланктон; здесь и далее прочерк обозначает отсутствие вида; жирным ирифтом выделены варианты эксперимента, достоверно ( $P > 0,95$ ) отличающиеся от варианта контроля.

Note: BF – biofilm; BR – bacterioplankton; here and below, a dash denotes the absence of species; the options significantly ( $P > 0,95$ ) differ from the control are highlighted in bold.

Таблица 2 / Table 2

Микробиоценоз биоплёнки ЖФ / Microbiocenosis of LF's biofilm

Микроорганизмы Microorganisms	Варианты эксперимента Options			
	контроль control	вариант 1 option 1	вариант 2 option 2	вариант 3 option 3
Факультативные анаэробы / Facultative anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$1,1 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$
доминирование, % / dominance, %	8,99	0,11	0,07	0,09
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$6,4 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$
доминирование, % / dominance, %	0,54	0,11	0,07	0,09
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$1,0 \cdot 10^5$	–		
доминирование, % / dominance, %	8,45			
Облигатные анаэробы / Obligate anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$8,7 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^5$
доминирование, % / dominance, %	73,62	46,71	49,75	49,20
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$6,8 \cdot 10^3$	$8,8 \cdot 10^3$	$9,4 \cdot 10^2$	$7,7 \cdot 10^2$
доминирование, % / dominance, %	0,58	0,58	0,06	0,05
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$8,6 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$8,8 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^5$
доминирование, % / dominance, %	73,04	46,13	55,38	49,15
Аэробы / Aerobes				
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$7,0 \cdot 10^2$	$7,0 \cdot 10^1$	$8,0 \cdot 10^1$	–
доминирование, % / dominance, %	0,06	< 0,01	< 0,01	
Грибы / Fungi				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$2,1 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$	$8,0 \cdot 10^5$
доминирование, % / dominance, %	17,33	53,18	44,49	50,71
Общее число МО / Total number				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$1,2 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$

Такие грамположительные анаэробы, как *Bifidobacterium* spp. и *Lactobacillus* spp., оказались наименее устойчивыми к добавкам ПАВ и к концу эксперимента исчезли из биоплёнок, однако отчасти сохранились в бактериопланктоне, а *Staphylococcus epidermidis* полностью отсутствовал в обработанных НС. Численность *Sarcina ventriculi*, *Peptoniphilus asaccharolyticus*, *Anaerococcus prevotii* в бактериопланктоне экспериментальных вариантов по сравнению с контролем несколько снизилась. Высокую устойчивость к наличию в субстрате ПАВ проявили спорообразующие клостридии (*Clostridium* spp.), вносящие существенный вклад в продуцирование разнообразных ЗОВ.

Количество грибов в биоплёнках под влиянием ПАВ практически не изменилось, однако в бактериопланктоне экспериментальных вариантов наблюдалось некоторое сниже-

ние численности *Candida* sp. по сравнению с контролем. *Aspergillus* spp. проявил высокую толерантность к ПАВ как в биоплёнках, так и в бактериопланктоне.

В таблице 2 приведены данные о доминирующих группах МО, представленных в биоплёнках контрольного и экспериментальных вариантов ЖФ.

В контрольных образцах биоплёнок (табл. 1 и 2) доминировали грамположительные облигатные анаэробы, представленные *Clostridium* spp. и *Bifidobacterium* spp., их числовое значение равнялось  $8,6 \cdot 10^5$  КОЕ/мл, что составляло 73,04% от общего числа МО НС. Следует отметить, что в биоплёнках всех исследуемых образцов преобладали грамположительные облигатные анаэробы, однако в опытных вариантах 1, 2 и 3 они были представлены исключительно бактериями рода *Clostridium* (*C. putrificum*, *C. perfringens*, *C. sporogenes*,

*C. bifermentans*, *C. septicum*, *C. difficile*). Количество клостридий варьировало в этих вариантах от  $7,0$  до  $8,8 \cdot 10^5$  КОЕ/мл, что соответствовало диапазону относительных значений от 46,13 до 55,38%. Возможно, это связано с тем, что при наступлении неблагоприятных для жизнедеятельности клостридий условий они способны к спорообразованию; данное свойство позволяет клостридиям проявлять повышенную устойчивость к действию неблагоприятных факторов, в том числе воздействию сурфактантов.

Факультативные анаэробные МО биоплёнок контроля представлены грамположительными бактериями *Staphylococcus epidermidis* и *Lactobacillus* ssp. ( $1,0 \cdot 10^5$  КОЕ/мл), что составляет 8,45% от общего числа МО НС. Использование ПАВ привело к их полному исчезновению в биоплёнках.

Применение сурфактантов повлияло на видовое разнообразие и количество грамотрицательных облигатных анаэробов. Их общее число в биоплёнках достоверно снизилось при использовании НПАВ до  $9,4 \cdot 10^2$  КОЕ/мл и АПАВ до  $7,7 \cdot 10^2$  КОЕ/мл по сравнению с контролем  $6,8 \cdot 10^3$  КОЕ/мл. Применение АПАВ привело к полному исчезновению в биоплёнках *Bacteroides* sp. (*B. ovatus*, *B. vulgatus*, *B. fragilis*), а использование КПАВ и НПАВ достоверно снизило их количество. Концентрация *Prevotella* sp. (*P. buccalis*, *P. intermedia*, *P. bivia*, *P. melaninogenica*, *P. oralis*) достоверно уменьшилась при применении НПАВ и АПАВ. Количество *Fusobacterium* sp. (*F. nucleatum*, *F. necrophorum* и *F. varium*) в биоплёнках достоверно не изменилось.

Грамотрицательные факультативные анаэробы в контроле биоплёнок, представленные бактериями рода *Escherichia* (*E. coli*, *E. blattae*, *E. coli inactive*, *E. fergusonii*, *E. hermannii*, *E. vulneris*), *Proteus* ssp. (*P. vulgaris*) и *Klebsiella* sp. составили  $6,4 \cdot 10^3$  КОЕ/мл (0,54% от общего числа МО НС). ПАВ достоверно снизили количество колиформных бактерий и *Proteus vulgaris* в вариантах 1, 2 и 3. *Klebsiella* sp. оказалась чувствительна к НПАВ и АПАВ.

Количество грибов в биоплёнках контрольных образцов было  $2,1 \cdot 10^5$  КОЕ/мл (17,33% от общего числа МО НС). Добавление ПАВ привело к незначительному увеличению количества *Candida* sp. и *Aspergillus* ssp. (изменения недостоверны, за исключением АПАВ) во всех опытных образцах ( $(7,1-8,1) \cdot 10^5$  КОЕ/мл). Интересно, что использование ПАВ снизило абсолютное количе-

ство грибов, но увеличило их доминирование в микробиоценозе НС (44,49–53,18%). Наиболее эффективным оказался НПАВ.

Аэробные МО контрольного образца биоплёнки были представлены *Pseudomonas* spp.  $7,0 \cdot 10^2$  КОЕ/мл, что составляло 0,1% от общего числа МО НС. Применение АПАВ привело к исчезновению МО, а КПАВ и НПАВ достоверно снизили концентрацию грамотрицательных бактерий.

В таблице 3 представлен микробиоценоз бактериопланктона и данные о доминирующих группах МО в ЖФ.

Микробиоценоз бактериопланктона (табл. 1 и 3) ЖФ свинных НС представлен облигатными и факультативными анаэробами, грибами и аэробными МО (расположены в порядке убывания). Следует отметить, что в бактериопланктоне, также, как и в биоплёнке преобладают грамположительные МО.

Грамположительные облигатные анаэробы  $1,4 \cdot 10^8$  КОЕ/мл составляют 46,11% от общего числа МО бактериопланктона контроля. Отмечено микробное разнообразие данной группы МО: так, кроме упоминаемых ранее *Clostridium* ssp. и *Bifidobacterium* ssp., обнаружены *Sarcina ventriculi*, *Peptoniphilus asaccharolyticus* и *Anaerococcus prevotii*. Добавки ПАВ достоверно снизили количество *Sarcina ventriculi* и *Peptoniphilus asaccharolyticus*, причем наиболее эффективно в отношении *S. ventriculi* сработали АПАВ, а в отношении *P. asaccharolyticus* – НПАВ и АПАВ. *Clostridium* ssp. также оказались не чувствительны к ПАВ и в бактериопланктоне.

Грамположительные факультативные анаэробы *Staphylococcus epidermidis* и *Lactobacillus* ssp. численно составляющие  $1,3 \cdot 10^8$  КОЕ/мл (44,47% от общего числа МО) в контроле, в вариантах 1, 2 и 3 были представлены исключительно *Lactobacillus* ssp.

Микробное разнообразие грамотрицательных облигатных анаэробных МО было аналогично таковому в биоплёнках и представлено *Prevotella* sp., *Fusobacterium* sp. и *Bacteroides* sp. Их абсолютное количество достигло  $1,1 \cdot 10^7$  КОЕ/мл (3,59% от общего числа МО) в контроле. Применение ПАВ достоверно снизило количество указанных МО (за исключением *Fusobacterium* sp. при использовании КПАВ), наиболее эффективен при использовании оказался АПАВ.

Среди факультативных анаэробов в бактериопланктоне контроля доминировали грамотрицательные МО *Escherichia coli*, *Proteus* spp. и *Klebsiella* sp., численность

Таблица 3 / Table 3

Микробиоценоз бактериопланктона ЖФ / Microbiocenosis of LF's bacterioplankton

Микроорганизмы Microorganisms	Варианты эксперимента / Options			
	контроль control	вариант 1 option 1	вариант 2 option 2	вариант 3 option 3
Факультативные анаэробы / Facultative anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,4 · 10 <sup>8</sup>	7,1 · 10 <sup>7</sup>	8,0 · 10 <sup>7</sup>	7,0 · 10 <sup>7</sup>
доминирование, % / dominance, %	47,22	48,05	50,60	44,10
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	8,0 · 10 <sup>6</sup>	7,4 · 10 <sup>5</sup>	1,3 · 10 <sup>5</sup>	7,5 · 10 <sup>4</sup>
доминирование, % / dominance, %	2,75	0,50	0,08	0,05
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,3 · 10 <sup>8</sup>	7,0 · 10 <sup>7</sup>	8,0 · 10 <sup>7</sup>	7,0 · 10 <sup>7</sup>
доминирование, % / dominance, %	44,47	47,55	50,52	44,05
Облигатные анаэробы / Obligate anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,5 · 10 <sup>8</sup>	6,9 · 10 <sup>7</sup>	7,1 · 10 <sup>7</sup>	8,8 · 10 <sup>7</sup>
доминирование, % / dominance, %	49,70	46,04	44,60	55,48
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,1 · 10 <sup>7</sup>	1,5 · 10 <sup>6</sup>	8,3 · 10 <sup>5</sup>	1,4 · 10 <sup>5</sup>
доминирование, % / dominance, %	3,59	1,00	0,52	0,09
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,4 · 10 <sup>8</sup>	6,8 · 10 <sup>7</sup>	7,0 · 10 <sup>7</sup>	8,8 · 10 <sup>7</sup>
доминирование, % / dominance, %	46,11	45,04	44,08	55,39
Аэробы / Aerobes				
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	3,0 · 10 <sup>3</sup>	8,0 · 10 <sup>3</sup>	7,0 · 10 <sup>3</sup>	8,0 · 10 <sup>2</sup>
доминирование, % / dominance, %	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Грибы / Fungi				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	9,0 · 10 <sup>6</sup>	8,7 · 10 <sup>6</sup>	7,6 · 10 <sup>6</sup>	6,7 · 10 <sup>5</sup>
доминирование, % / dominance, %	3,08	5,91	4,80	0,42
Общее число МО / Total number				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	2,9 · 10 <sup>8</sup>	1,5 · 10 <sup>8</sup>	1,6 · 10 <sup>8</sup>	1,6 · 10 <sup>8</sup>

составила 8,0 · 10<sup>6</sup> КОЕ/мл (2,75% от общего числа МО). Добавление ПАВ достоверно снизило их количество, однако уровень *Klebsiella* sp. при использовании КПАВ не достоверно возрос.

Грибы в микробном сообществе бактериопланктона контроля составляли 9,0 · 10<sup>6</sup> КОЕ/мл (3,08% от общего числа МО) и были представлены *Candida* sp. и *Aspergillus* spp. Наиболее эффективным оказался АПАВ, использование КПАВ и НПАВ привело к доминированию грибов (5,91 и 4,80% соответственно). Абсолютное количество *Candida* sp. достоверно снижалось при использовании всех типов ПАВ.

Аэробы *Pseudomonas* spp. в пробах бактериопланктона находились в ничтожно малых количествах (менее 0,01%), применение АПАВ оказалось наиболее эффективным препаратом для снижения их численности.

### Заключение

Выполненные исследования показали, что даже небольшие добавки ПАВ (0,01 г/л) могут оказать существенное влияние на эмиссию парниковых газов, запахообразующих веществ и микробиоту навозных стоков. Положительное влияние на эмиссию CH<sub>4</sub> оказало внесение в ЖФ КПАВ. Можно предположить, что данный эффект обусловлен спецификой воздействия КПАВ на цитоплазматические мембраны разных групп МО, а именно повышением проницаемости мембран метаногенных архей, в результате которого активируется их метаболизм, и разрушением мембран эукарит, вызывающим гибель повреждённых клеток. Снижение конкуренции со стороны эукариот обеспечивает некоторые преимущества метаногенным археям.

Добавка различных типов ПАВ не приводит к подавлению выделения запахообра-

зующих веществ, однако период активной эмиссии меркаптанов становится более продолжительным. В варианте эксперимента с добавкой НПАВ в ВГ выявлено наиболее высокое содержание этилмеркаптана. Вероятно, данный эффект обусловлен формированием более плотных и устойчивых биоплёнок на границе ЖФ/воздух, изолирующих бактериопланктон от воздействия  $O_2$ , что обеспечивает оптимальные условия для анаэробных процессов аммонификации, сопровождающихся образованием соответствующего ЗОВ. Существенных различий в воздействии низких концентраций различных типов ПАВ на микробиоту ЖФ выявлено не было, однако по комплексу показателей добавка АПАВ оказывает более выраженное бактериостатическое влияние на микробиоту и эмиссию ЗОВ, чем остальные ПАВ.

В биоплёнках и бактериопланктоне всех вариантов эксперимента доминировали различные представители рода *Clostridium* ssp. – грамположительные облигатные анаэробы. На втором месте по численности в биоплёнках находились грибы. За счёт спорообразования для клостридий характерна высокая устойчивость к воздействию различных неблагоприятных факторов внешней среды, включая воздействие химических веществ. Соответствующие МО вносят основной вклад в процессы аммонификации биогенных отходов, сопровождающиеся выделением ЗОВ. Подавление численности клостридий, а, следовательно, ограничение эмиссии ЗОВ за счёт обработки НС относительно безопасными для окружающей среды веществами, представляет большую проблему.

### Литература

1. Авроров В.А., Лузгин Г.Д., Авроров Г.В., Польдяева М.А. О новой энергосберегающей технологии приготовления корма для животных, птиц и рыб // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2016. № 1 (29). С. 75–78.
2. Романовская А.А. Эмиссия закиси азота в животноводстве Российской Федерации в 1990–2004 годах // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2007. № 5. С. 42–44.
3. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 26–34.
4. Сырчина Н.В., Кантор Г.Я., Пугач В.Н., Ашихмина Т.Я. Вклад углекислого газа и воды в парниковый эффект // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 218–223.

5. Колеватых Е.П., Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Козловин В.А., Ашихмина Т.Я. Трансформация микробиоты отходов животноводства под влиянием химических реагентов для устранения запаха // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 159–165.
6. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Колеватых Е.П., Ашихмина Т.Я., Кузнецов Д.А. Влияние гипохлорита натрия на микробиоту и запах навозных стоков // Поволжский экологический журнал. 2023. № 1. С. 107–116.
7. Николаенко Н.Н., Аржаков В.Н., Аржаков П.В., Копылов Г.М., Кулинич Е.Н. Спороцидное действие нового полифункционального биоцидного препарата // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 447–451.
8. Шаймухаметов М.А., Иванов А.И., Струнин Б.П., Кильметова И.Р. Применение дезинфицирующего средства роксацин в телятниках, неблагополучных по эшерихиозу // Ветеринария Кубани. 2015. № 5. С. 25–26.
9. Glover R.E., Smith R.R., Jones M.V., Jackson S.K., Rowlands C.C. An EPR investigation of surfactant action on bacterial membranes // FEMS Microbiology Letters. 1999. V. 177. No. 1. P. 57–62.
10. Murguía M.C., Cristaldi M.D., Porto A., Conza J.D., Grau R. Synthesis, surface-active properties, and antimicrobial activities of new neutral and cationic trimeric surfactants // Journal of Surfactants and Detergents. 2008. V. 11. P. 41–48.
11. Trejos-Delgado C., Cadavid-Restrepo G.E., Hormaza-Anaguano A., Agudelo E.A., Barrios-Ziolo L., Loaiza-Usuga J.C., Cardona-Gallo S.A. Oil bioremediation in a tropical contaminated soil using a reactor // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2020. V. 92. No. 2. P. 20181–20201.
12. Lladó S., Covino S., Solanas A.M., Viñas M., Petruccioli M., D'annibale A. Comparative assessment of bioremediation approaches to highly recalcitrant PAH degradation in a real industrial polluted soil // Journal of Hazardous Materials. 2013. V. 248. P. 407–414.
13. Muthukumar N., Maruthamuthu S., Palaniswamy N. Role of cationic and nonionic surfactants on biocidal efficiency in diesel-water interface // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2007. V. 57. No. 2. P. 152–160.
14. Treter J., Bonatto F., Krug C., Soares G.V., Baumvol I.J.R., Macedo A.J. Washing-resistant surfactant coated surface is able to inhibit pathogenic bacteria adhesion // Applied Surface Science. 2014. V. 303. P. 147–154.
15. André V. Effect of sodium lauryl sulfate (SLS) applied as a patch on human skin physiology and its microbiota // Cosmetics. 2021. V. 8. No. 1. Article No. 6.
16. García-Morales J.L., Nebot E., Romero L.I., Sales D. Comparison between acidogenic and methanogenic inhibition caused by linear alkylbenzene-sulfonate (LAS) // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 2001. V. 15. No. 1. P. 13–19.
17. Палий А.П., Палий А.П., Родионова Е.А. Дезинфицирующие средства в системе противозэпи-

зоотических мероприятий // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 2. С. 24–33.

18. Carmona-Ribeiro A.M., de Melo Carrasco L.D. Cationic antimicrobial polymers and their assemblies // International Journal of Molecular Sciences. 2013. V. 14. No. 5. P. 9906–9946.

19. Robinson V.C. Final report of the amended safety assessment of sodium laureth sulfate and related salts of sulfated ethoxylated alcohols // International Journal of Toxicology. 2010. V. 29. No. 4. P. 151–161.

20. Wang J., Xue J., Dong X., Yu Q., Baker S.N., Wang M., Huang H. Antimicrobial properties of benzalkonium chloride derived polymerizable deep eutectic solvent // International Journal of Pharmaceutics. 2020. V. 575. P. 119005–119021.

21. Singh S.K., Bajpai M., Tyagi V.K. Amine oxides: a review // Journal of Oleo Science. 2006. V. 55. No. 3. P. 99–119.

22. Fernández-Serrano M., Jurado E., Fernández-Arteaga A., Ríos F., Lechuga M. Ecotoxicological assessment of mixtures of ether carboxylic derivative and amine-oxide-based non-ionic surfactants on the aquatic environment // Journal of Surfactants and Detergents. 2014. V. 17. No. 6. P. 1161–1168.

23. Thauer R.K., Kaster A.K., Seedorf H., Buckel W., Hedderich R. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation // Nature Reviews Microbiology. 2008. V. 6. No. 8. P. 579–591.

24. Zhu X., Campanaro S., Treu L., Seshadri R., Ivanova N., Kougias P.G., Kyrpides N., Angelidaki I. Metabolic dependencies govern microbial syntrophies during methanogenesis in an anaerobic digestion ecosystem // Microbiome. 2020. V. 8. No. 1. Article No. 22.

25. Gould S.B. Membranes and evolution // Current Biology. 2018. V. 28. No. 8. P. 381–385.

26. Mayer F., Enzmann F., Lopez A.M., Holtmann D. Performance of different methanogenic species for the microbial electrosynthesis of methane from carbon dioxide // Bioresource Technology. 2019. V. 289. Article No. 121706.

27. Kermani M., Bina B., Movahedian H., Amin M.M., Nikaein M. Application of moving bed biofilm process for biological organics and nutrients removal from municipal wastewater // American Journal of Environmental Sciences. 2008. V. 4. No. 6. P. 675–689.

28. Чиркин А.А. Фотосинтез // Хімія: проблеми викладання. 2006. № 12. С. 3–12.

## References

1. Avrorov V.A., Luzgin G.D., Avrorov G.V., Poldyaeva M.A. About the new energy-saving technology of food preparation for animals, birds and fish // XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus. 2016. No. 1 (29). P. 75–78 (in Russian).

2. Romanovskaya A.A. Nitrous oxide emissions from livestock farming in the Russian Federation in 1990–2004 // Doklady Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk. 2007. No. 5. P. 42–44 (in Russian).

3. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Control of odor pollution of atmospheric air (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 26–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034

4. Syrchina N.V., Kantor G. YA., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223

5. Kolevatykh E.P., Pilip L.V., Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Ashikhmina T.Ya. Transformation of the microbiota of animal husbandry waste under the influence of chemical reagents to eliminate odor // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 159–165 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165

6. Syrchina N.V., Pilip L.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya., Kuznetsov D.A. Effect of sodium hypochlorite on the microbiota and odor of manure effluents // Povolzhskiy Journal of Ecology. 2023. No. 1. P. 107–116 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116

7. Nikolaenko N.N., Arzhakov V.N., Arzhakov P.V., Kopylov G.M., Kulinich E.N. Sporocidal effects of the preparation of a new multifunctional biocide // Modern problems of Science and Education. 2012. No. 2. P. 447–451 (in Russian).

8. Shaymukhametov M.A., Ivanov A.I., Strunin B.P., Kilmetova I.R. Use of Roxacyn disinfectant in calf-shed with escherichiosis // Veterinariya Kubani. 2015. No. 5. P. 25–26 (in Russian).

9. Glover R.E., Smith R.R., Jones M.V., Jackson S.K., Rowlands C.C. An EPR investigation of surfactant action on bacterial membranes // FEMS Microbiology Letters. 1999. V. 177. No. 1. P. 57–62. doi: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13713.x

10. Murguía M.C., Cristaldi M.D., Porto A., Conza J.D., Grau R. Synthesis, surface-active properties, and antimicrobial activities of new neutral and cationic trimeric surfactants // Journal of Surfactants and Detergents. 2008. V. 11. P. 41–48. doi: 10.1007/s11743-007-1052-4

11. Trejos-Delgado C., Cadavid-Restrepo G.E., Hormaza-Anaguano A., Agudelo E.A., Barrios-Ziolo L., Loaiza-Usuga J.C., Cardona-Gallo S.A. Oil bioremediation in a tropical contaminated soil using a reactor // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2020. V. 92. No. 2. P. 20181–20201. doi: 10.1590/0001-3765202020181396

12. Lladó S., Covino S., Solanas A.M., Viñas M., Petruccioli M., D'annibale A. Comparative assessment of bioremediation approaches to highly recalcitrant PAH degradation in a real industrial polluted soil // Journal of Hazardous Materials. 2013. V. 248–249. P. 407–414. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.01.020

13. Muthukumar N., Maruthamuthu S., Palaniswamy N. Role of cationic and nonionic surfactants on biocidal efficiency in diesel-water interface // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2007. V. 57. No. 2. P. 152–160. doi: 10.1016/j.colsurfb.2007.01.019
14. Treter J., Bonatto F., Krug C., Soares G.V., Baumvol I.J.R., Macedo A.J. Washing-resistant surfactant coated surface is able to inhibit pathogenic bacteria adhesion // *Applied Surface Science*. 2014. V. 303. P. 147–154. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.02.123
15. Leoty-Okombi S., Gillaizeau F., Leuillet S., Douillard B., Le Fresne-Languille S., Carton T., De Martino A., Moussou P., Bonnaud-Rosaye C., André V. Effect of sodium lauryl sulfate (SLS) applied as a patch on human skin physiology and its microbiota // *Cosmetics*. 2021. V. 8. No. 1. Article No. 6. doi: 10.3390/cosmetics8010006
16. García-Morales J.L., Nebot-Sanz E., Romero García L.I., Sales D. Comparison between acidogenic and methanogenic inhibition caused by linear alkylbenzene-sulfonate (LAS) // *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2001. V. 15. No. 1. P. 13–19.
17. Paliy A.P., Paliy A.P., Rodionova E.A. Disinfectants in the system of antiepidemiological measures // *Izvestiya velikolukskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2017. No. 2. P. 24–33 (in Russian).
18. Carmona-Ribeiro A.M., De Melo Carrasco L.D. Cationic antimicrobial polymers and their assemblies // *International Journal of Molecular Sciences*. 2013. V. 14. No. 5. P. 9906–9946. doi: 10.3390/ijms14059906
19. Robinson V.C., Bergfeld W.F., Belsito D.V., Hill R.A., Klaassen C.D., Marks J.G.Jr., Shank R.C., Slaga T.J., Snyder P.W., Alan Andersen F. Final report of the amended safety assessment of sodium laureth sulfate and related salts of sulfated ethoxylated alcohols // *International Journal of Toxicology*. 2010. V. 29. No. 4. P. 151–161. doi: 10.1177/1091584810373151
20. Wang J., Xue J., Dong X., Yu Q., Baker S.N., Wang M., Huang H. Antimicrobial properties of benzalkonium chloride derived polymerizable deep eutectic solvent // *International Journal of Pharmaceutics*. 2020. V. 575. P. 119005–119021. doi: 10.1016/j.ijpharm.2019.119005
21. Singh S.K., Bajpai M., Tyagi V.K. Amine oxides: a review // *Journal of Oleo Science*. 2006. V. 55. No. 3. P. 99–119. doi: 10.5650/jos.55.99
22. Fernández-Serrano M., Jurado E., Fernández-Arteaga A., Ríos F., Lechuga M. Ecotoxicological assessment of mixtures of ether carboxylic derivative and amine-oxide-based non-ionic surfactants on the aquatic environment // *Journal of Surfactants and Detergents*. 2014. V. 17. No. 6. P. 1161–1168. doi: 10.1007/s11743-014-1621-2
23. Thauer R.K., Kaster A.K., Seedorf H., Buckel W., Hedderich R. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation // *Nature Reviews Microbiology*. 2008. V. 6. No. 8. P. 579–591. doi: 10.1038/nrmicro1931
24. Zhu X., Campanaro S., Treu L., Seshadri R., Ivanova N., Kougias P.G., Kyrpidis N., Angelidaki I. Metabolic dependencies govern microbial syntrophies during methanogenesis in an anaerobic digestion ecosystem // *Microbiome*. 2020. V. 8. No. 1. Article No. 22. doi: 10.1186/s40168-019-0780-9
25. Gould S.B. Membranes and evolution // *Current Biology*. 2018. V. 28. No. 8. P. 381–385. doi: 10.1016/j.cub.2018.01.086
26. Mayer F., Enzmann F., Lopez A.M., Holtmann D. Performance of different methanogenic species for the microbial electrosynthesis of methane from carbon dioxide // *Bioresource Technology*. 2019. V. 289. Article No. 121706. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121706
27. Kermani M., Bina B., Movahedian H., Amin M.M., Nikaein M. Application of moving bed biofilm process for biological organics and nutrients removal from municipal wastewater // *American Journal of Environmental Sciences*. 2008. V. 4. No. 6. P. 675–682. doi: 10.3844/ajessp.2008.675.682
28. Chirkin A.A. Photosynthesis // *Khimiya: problemy vykladannya*. 2006. No. 12. P. 3–12 (in Russian).