

Введение Ранее были представлены результаты исследования процесса очистки сточных вод предприятия по переработке молока в комбинированной анаэробно-аэробной лабораторной установке. Представлены зависимости показателей эффективности работы анаэробной стадии в зависимости от органической и гидравлической нагрузки [1]. Полученные зависимости были использованы для математического моделирования и последующей оптимизации технологического процесса [2]. Целью настоящей работы являлось исследование процесса анаэробно-аэробной биологической очистки сточных вод молочного производства с точки зрения эффективности образования вторичного энергоносителя - биогаза в зависимости от условий проведения процесса, в первую очередь органической и гидравлической нагрузки. Планируется использовать эти зависимости для многокритериальной оптимизации технологического процесса, в том числе с учетом количества, химического состава, а следовательно, и теплотворной способности получаемого альтернативного биотоплива - биогаза [3]. Экспериментальная часть При лабораторном моделировании процесса биологической очистки сточных вод были использованы реальные сточные воды действующего предприятия по переработке молока и модельные сточные воды аналогичного химического состава (с эквивалентными значениями ХПК, содержания жиров, содержания взвешенных веществ). Анаэробная стадия очистки сточных вод включала в себя аппарат первой ступени (ступень 1) и в качестве второй ступени - три параллельных аппарата различного объема (ступени 2-1, 2-2, 2-3). Их объемы и характеристики режимов представлены в табл.1. Как и ранее [2], процесс биологической очистки сточных вод вели в условиях варьирования удельной скорости потока D и удельной органической нагрузки L путем изменения объемного расхода сточной воды G до установившегося режима. Таблица 1 - Описание ступеней и режимов работы установки

Показатели	Размерность	Ступени очистки	1	2-1	2-2	2-3
Расход G см ³ ·ч ⁻¹			49,5	12,5	16,7	16,7
Расход G дм ³ ·сут ⁻¹			1,19	0,30	0,40	0,40
Объем биореактора V дм ³			2,64	2,00	1,52	0,74
Скорость потока D сут ⁻¹			0,45	0,15	0,26	0,54

Результаты и их обсуждение Ранее [1] уже обсуждали вопрос об эффективности работы исследованной комбинированной технологии (E , %) в зависимости от изменений параметров процесса. В процессе проведения описываемой серии экспериментов этот показатель также анализировался в зависимости от удельной органической нагрузки L . Результаты исследований показаны на рис.1. Рис. 1 - Зависимость эффективности очистки от удельной органической нагрузки По представленным на рис.1 данным можно сделать вывод о том, что эффективность очистки исследованных сточных вод практически не зависит от удельной органической нагрузки L , о чем свидетельствует низкое значение достоверности аппроксимации, равное 0,18. Эффективность остается постоянной и достаточно высокой, что является свидетельством высокой метаболической лабильности селекционированного

микробного анаэробного сообщества. Таким образом, с точки зрения эффективности технология обеспечивает высокую степень очистки во всем исследованном диапазоне нагрузок. Этот результат согласуется с ранее полученными данными [1], в которых также показано, что суммарная эффективность очистки в многоступенчатой анаэробно-аэробной установке меняется незначительно, но происходит перераспределение доли органического вещества, подвергнутого биодеструкции, на более поздние, т.е. аэробные, стадии процесса. Далее проводили анализ полученных данных с точки зрения энергетической эффективности технологии очистки сточных вод. Для этого исследовали величину интегральной продукции биогаза ($V_{бг}$, см²·сут⁻¹) (рис. 2, 3), удельную скорость деструкции органического вещества C (мг дм⁻³·сут⁻¹) и удельный выход биогаза от потребленного органического вещества ХПК $Y_{бг}$, см²·г⁻¹ (рис.4). Рис. 2 – Динамика интегральной продукции биогаза $V_{бг}$ Из рис.2 видно, что величина интегральной продукции биогаза на первой ступени анаэробной стадии существенно отличается от аналогичных показателей на вторых ступенях как по абсолютной величине (она не превышает 100 мл за сутки), так и по характеру зависимости от удельной органической нагрузки L . Другими словами, образование биогаза на первой ступени практически не наблюдается при всех исследованных режимах. С другой стороны, на всех вторичных ступенях зависимости образования биогаза от органической нагрузки близки. Это можно объяснить тем, что на эти ступени поступает эффлюент из первой ступени идентичного химического состава, поэтому они находятся в близких условиях по гидравлической и органической нагрузке. Эти зависимости без учета первой ступени и без разделения по фазам представлены на рис.3. Рис. 3 – Интегральная динамика продукции биогаза $V_{бг}$ на вторичных фазах анаэробной ступени Как видно из данных рис.3, интегральная продукция биогаза во всех исследованных режимах закономерно возрастает с увеличением удельной органической нагрузки с высокой достоверностью. При «этом затухания» этой тенденции не наблюдается, поэтому представляется необходимым продолжение данных исследований в более «напряженных» режимах с более высокой удельной органической нагрузкой. Если говорить о причине такой тенденции повышения продукции биогаза с ростом удельной органической нагрузки, то объяснение легко можно найти при анализе динамики удельного газообразования в зависимости от удельной органической нагрузки. Она носит практически такой же характер, как и интегральная продукция биогаза (рис.2). В связи с этим представляется интересным определение удельного выхода биогаза от потребленного органического вещества (в виде ХПК) в зависимости от изменения органической нагрузки. Такая зависимость представлена на рис. 4. Рис. 4 - Удельный выход биогаза от потребленного органического вещества $Y_{бг}$, см²·г⁻¹ Как видно из представленных на рисунке 4 зависимостей, с изменением удельной

органической нагрузки L величина удельного выхода биогаза мало меняется, о чем свидетельствуют низкие значения достоверности аппроксимации (соответственно равные 0,001, 0,59 и 0,44). Такой вид зависимости хорошо согласуется с представлением о стехиометрическом характере такой зависимости [4], другими словами, удельный выход биогаза от потребленного органического вещества Y_{bg} определяется в основном химическим составом потребленного вещества вне зависимости от удельной органической нагрузки L . Однако налицо разница в абсолютных значениях этого выхода при различных соотношениях объема первой и второй фазы анаэробной ступени. Наибольшая сбалансированность процесса, равно как и наибольшая величина Y_{bg} , равная $350 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$, наблюдается на ступени 2-3, функционировавшей при наибольшей скорости протока D , равной $0,54 \text{ сут}^{-1}$. При более низких соотношениях объема и скоростях протока (ступени 2-1 и 2-3) величина Y_{bg} существенно ниже и составляет 150 и $90 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$, соответственно. Выводы 1. Степень очистки сточных вод от органического вещества во всех исследованных режимах была высокой и практически не зависела от условий проведения процесса, т.е. органической и гидравлической нагрузки. 2. Динамика образования биогаза на первой и последующих ступенях существенно отличаются как по абсолютной величине, так и по характеру зависимости от гидравлической и органической нагрузки. 3. Удельный выход биогаза от потребленного органического вещества Y_{bg} определяется химическим составом потребленного вещества во всех исследованных режимах удельной органической нагрузки L и соотношением времен пребывания на первой и второй фазе анаэробной ступени очистки. 4. Наибольшая величина Y_{bg} , равная $350 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ потребленного ХПК, наблюдается при скорости протока D , равной $0,54 \text{ сут}^{-1}$.