

БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 556.01+628.357.4

Е. А. Флюрик, старший преподаватель, кандидат биологических наук (БГТУ);

О. В. Абрамович, инженер-технолог (УП «Минскводоканал»);

А. А. Змитрович, инженер по охране окружающей среды (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ *EICHORNIA CRASSIPES* ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И ПОЛУЧЕНИЯ КОРМОВОЙ ДОБАВКИ

Статья посвящена изучению способа очистки сточных вод с помощью высшего водного растения водного гиацинта (*Eichornia crassipes*). Проведенные исследования показали, что растение позволяет в среднем снизить показатель ХПК загрязненных вод на 90%. Кроме того, показано, что избыток зеленой массы водного гиацинта можно использовать при производстве кормовой добавки для сельскохозяйственных животных.

The article devotes to the studying of the method of sewage treatment using higher aqueous plant water hyacinth (*Eichornia crassipes*). Studies have shown that the plant can reduce the average COD of polluted water by 90%. Moreover, was shown that the excess of the green mass of water hyacinth can be used in the production of feed additives for farm animals.

Введение. Идея использования растений для очистки загрязненных вод не является новой, так как можно назвать немало известных растений, очищающих воду в болотах, прудах и озерах, например, ряску (*Lemna* L.), вольфию (*Wolffia arrhiza* L.), камыш (*Scirpus sylvaticus* L.), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.), рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.), элодею (*Elodea* Michx.), сусак (*Butomus* L.), стрелолист обычный (*Sagittaria* L.), уруть (*Myriophyllum* L.), роголистник (*Ceratophyllum* L.) [1, 2].

Еще одним высшим водным растением (ВВР), известным в качестве хорошего очистителя загрязненных вод, является *Eichornia crassipes* (эйхорния толсточерешковая, водный гиацинт), которая относится к семейству *Pontederiaceae* (Понтедериевые). Это многолетнее водное растение, родиной которого являются тропические районы Южной Америки, однако в настоящее время оно расселилось повсеместно в странах Азии, Африки, Австралии.

При достаточном количестве тепла и света, в богатой питательными веществами воде растение способно разрастаться очень быстро. Так, например, в тропиках 1 розетка за 50 сут способна давать до тысячи новых растений.

Эйхорния является полупогруженным растением и способна существовать как в свободноплавающем на поверхности воды, так и в прикрепленном состоянии.

В строении листьев наблюдается гетерофилия. Листья образуют плавающую на поверхности воды розетку, а вздутия, внутри которых находится воздухоносная ткань, выполняют функцию поплавков, придающих растению устойчивость. Листья темно-зеленые, глянцевые.

Когда эйхорния растет одиночным кустиком, образуются большие вздутия, благодаря которым растение не опрокидывается на поверхности воды. Если же его окружают другие розетки, тогда вздутия уменьшаются в размерах, становятся вытянутыми, бутылковидными. На взрослом растении может быть до 10 листьев.

В конце лета, в период цветения, из центра розетки поднимается цветонос с колосовидным соцветием, на котором появляются фиолетово-голубые цветки, в центре более ярко окрашенного верхнего лепестка находится темно-желтое пятно.

В естественных условиях путем опыления тропическими насекомыми у растения образуется плод – коробочка с семенами [3]. Так как в естественных условиях эйхорния произрастает в странах с тропическим и субтропическим климатом, особенностью применения растения в наших условиях является его сезонность.

Размножается эйхорния в наших условиях только вегетативно прямо в водоеме боковыми отпрысками. На столлонах – боковых горизонтальных побегах появляются молодые растения с корешками.

Корневая система эйхорнии, находящаяся в воде, представляет собой длинные, нитевидные волоски, которые обеспечивают основной процесс очистки. Эйхорния, благодаря своей хорошо развитой корневой системе, способна осаживать взвешенные вещества, содержащиеся в воде и быстро очищать загрязненную воду, поэтому в настоящее время данное растение считают одним из лучших растений-фильтров.

Кроме того, в тропических странах нашли применение зеленой биомассе растения:

ее используют на корм рыбам, водоплавающим птицам и скоту, в качестве зеленого удобрения, в производстве биогаза. А также высушенные части растений используют при производстве бумаги невысокого качества, стеновых плит, веревок, средств личной гигиены, корзин, мебели [4, 5].

В настоящее время эйхорния начинает завоевывать популярность не только в России, но и в нашей республике. Так в Институте цитологии и генетики СО РАН разработана биологическая технология очистки сточных вод различного происхождения с помощью эйхорнии, а на озере Юбилейное (г. Гродно) сотрудниками РУАП «Гродненская овощная фабрика» [6] высажены несколько сотен розеток растения для его очистки.

Однако в работе [7] указано, что наиболее эффективным способом использования эйхорнии является доочистка биологически очищенных стоков, имеющих более стабильный состав по сравнению с исходными стоками, так как сверхнормативные сбросы специфических за-

грязняющих веществ приводят к частичной гибели растений.

Цель работы – определить эффективность очистки сточных вод с помощью высшего водного растения *Eichornia crassipes* и возможность использования биомассы растения для производства кормовой добавки.

Основная часть. На первом этапе исследований с помощью микроскопа (MBL2000-Serie Multipurpose microscope, Германия) было изучено строение листьев и корней водного гиацинта.

Листья водного гиацинта (рис. 1, а) покрыты восковым налетом, плохо пропускающим влагу. Это способствует уменьшению потери воды с поверхности листьев и поддержанию растения на поверхности водоемов. Сверху и снизу лист покрыт покровной тканью (рис. 1, б). Среди бесцветных клеток кожицы с нижней стороны расположены парные полукруглые устьичные клетки, между которыми имеется отверстие – устьичная щель (рис. 1, в).

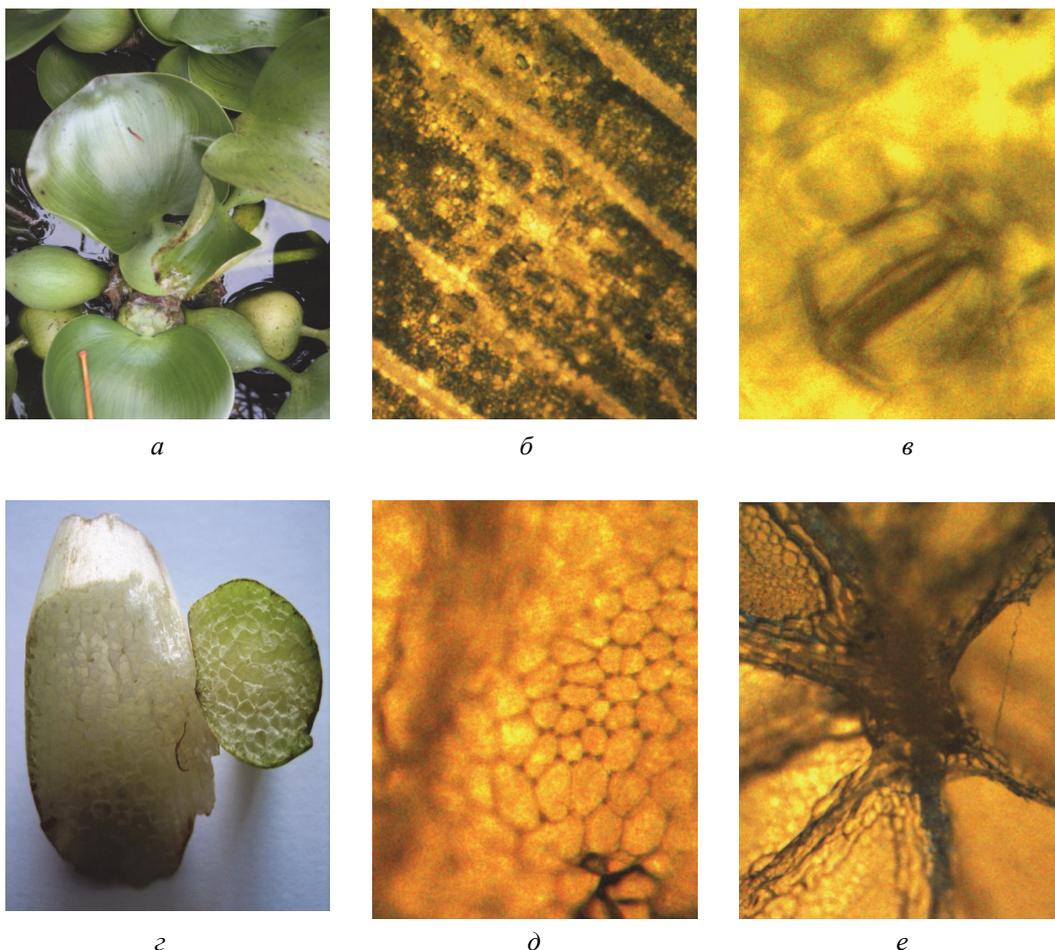


Рис. 1. Эйхорния *Eichornia crassipes*:
 а – растение в водоеме; б – нижняя поверхность листа при увеличении $\times 40$;
 в – устьице при увеличении $\times 400$; г – разрез черешка водного гиацинта;
 д – аэренхима при увеличении $\times 100$;
 е – соединение клеток аэренхимы при увеличении $\times 40$

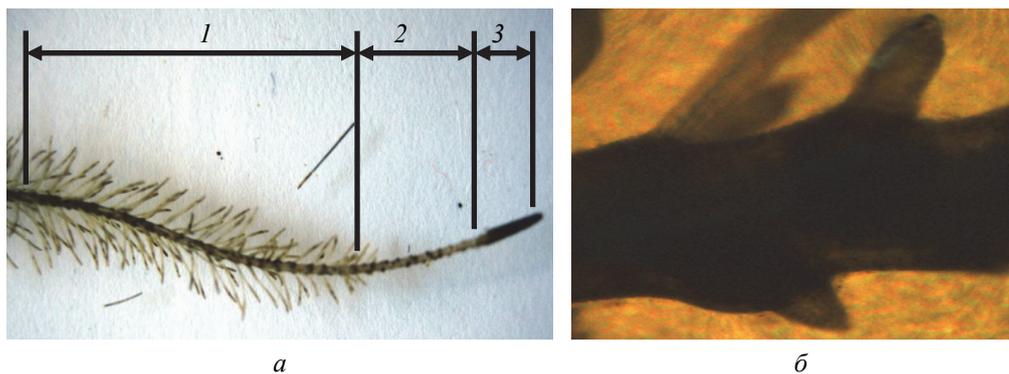


Рис. 2. Корень эйхорнии:
а – корень (1 – зона всасывания; 2 – зона растяжения; 3 – зона деления);
б – место роста корневых волосков при увеличении $\times 40$

Внутренняя часть листа образована ассимилирующей тканью, обеспечивающей процесс фотосинтеза. Клетки этой ткани содержат большое количество хлоропластов, которые и придают зеленый цвет листу. Мякоть листа пронизана жилками, образованными проводящими сосудами и ситовидными трубками, а так же волокнами, придающими прочность. Водный гиацинт имеет весьма необычные, шаровидно вздутые черешки (рис. 1, *з*).

Основную часть черешков составляет воздухоносная ткань или аэренхима, построенная из клеток, соединенных между собой таким образом, что между ними остаются крупные заполненные воздухом пустоты (крупные межклетники) (рис. 1, *д*). Построена аэренхима из клеток звездчатой формы, соединенных друг с другом своими отростками (рис. 1, *е*). Благодаря аэренхиме уменьшается удельный вес растения и органы растения держатся прямо в воде.

Водный гиацинт обладает очень развитой корневой системой. Корень (рис. 2, *а*) по длине можно разделить на несколько участков, имеющих различное строение и выполняющих определенные функции. Эти участки называют зонами корня. Выделяют корневую чехлик и следующие зоны: деления, растяжения, всасывания и проведения, которые хорошо различимы невооруженным глазом.

Корневые волоски (рис. 2, *б*) – это сильно удлиненные выросты наружных клеток, покрывающих корень. Их длина достигает 10 мм. Корень непрерывно растет, образуя все новые участки корневых волосков. Участок корня, где корневые волоски отмерли, некоторое время способен всасывать воду, но затем покрывается пробкой и теряет эту способность.

Оболочка волоска очень тонкая, что облегчает поглощение питательных веществ. Почти всю клетку волоска занимает вакуоль, окруженная тонким слоем цитоплазмы. Поглощению способствует выделение корневыми во-

лосками кислот (угольной, яблочной, лимонной), которые растворяют минеральные соли. Именно наличием развитой корневой системы с большим количеством корневых волосков и объясняется способность эйхорнии к очистке загрязненных стоков и удалению огромного спектра загрязнений.

В литературе есть данные о том, что с помощью эйхорнии можно извлечь из стоков большинство биогенных элементов, таких как азот, фосфор, калий, кальций, магний, марганец, сера, а также удалять фенолы, сульфаты, нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества, фосфаты. При этом уменьшаются показатели ХПК и БПК [8–10].

Для изучения эффективности очистки сточных вод с помощью эйхорнии были использованы модельная сточная вода и вода с Минской очистной станции (МОС). В емкости с 5 дм³ сточной воды помещали по одной розетке эйхорнии. Использовали шести месячные растения. Эксперимент проводили в трехкратной повторности при комнатной температуре (22 ± 2)°С.

Состав модельной сточной воды разработан в соответствии с литературными данными о допустимых значениях концентраций загрязняющих веществ в сточных водах, очищаемых с помощью эйхорнии (табл. 1) [11].

Таблица 1
Состав модельной сточной воды

Химическое вещество	Количество, мг/дм ³
Натрия гидрофосфат двенадцативодный	67,80
Аммония нитрат	282,35
Натрия сульфид девятиводный	157,50
Железа хлорид шестиводный	106,27
СПАВ	14,00
Нефтепродукты	25,00
Фенолы	340,00

В процессе очистки проводились измерения основных показателей очищаемых вод, результаты представлены в табл. 2 и 3.

Окончание табл. 3

Таблица 2

Показатели очистки модельной сточной воды

Показатели	Модельная сточная вода	
	контроль*	образец**
БПК, мг O ₂ /дм ³		
0 сут	306,1 ± 15,3	
8 сут	253,1 ± 12,7	169,2 ± 8,5
19 сут	200,4 ± 10,0	69,1 ± 3,5
ХПК, мг O ₂ /дм ³		
0 сут	591,8 ± 29,6	
6 сут	552,3 ± 27,6	441,6 ± 22,1
15 сут	507,4 ± 25,4	158,2 ± 7,9
27 сут	481,7 ± 24,1	73,6 ± 3,7
Нитрат-ионы, мг/дм ³		
0 сут	205,8 ± 10,4	
27 сут	201,4 ± 10,7	8,7 ± 0,4
Ионы аммония, мг/дм ³		
0 сут	58,6 ± 3,1	
28 сут	55,4 ± 2,8	5,3 ± 0,3
Фосфат-ионы, мг/дм ³		
0 сут	18,2 ± 0,9	
29 сут	17,4 ± 0,9	1,2 ± 0,1
Фенолы		
0 сут	345,3 ± 17,0	
29 сут	308,1 ± 10,3	Отсутствуют
Жиры и масла, мг/дм ³		
0 сут	25,3 ± 1,3	
30 сут	20,7 ± 1,1	Отсутствуют

В ходе исследований было установлено, что менее чем за 30 сут эффективность очистки модельной сточной воды составила более 80%. Показатели очистки сточной воды с МОС несколько хуже, но все полученные результаты подтверждают возможность использования эйхорнии для очистки сточных вод.

Таблица 3

Показатели очистки сточной воды с МОС

Показатели	Сточная вода с МОС	
	контроль*	образец**
БПК, мг O ₂ /дм ³		
0 сут	243,0 ± 12,2	
12 сут	189,1 ± 9,5	84,1 ± 4,2
ХПК, мг O ₂ /дм ³		
0 сут	572,9 ± 28,5	
12 сут	385,3 ± 19,3	172,6 ± 8,6
21 сут	303,3 ± 15,2	58,2 ± 2,9
Нитрат-ионы, мг/дм ³		
0 сут	0,29 ± 0,01	
20 сут	0,51 ± 0,03	–
Нитрит-ионы, мг/дм ³		
0 сут	0,11 ± 0,01	
20 сут	0,12 ± 0,01	0,10 ± 0,01

Показатели	Сточная вода с МОС	
	контроль*	образец**
Ионы аммония		
0 сут	39,5 ± 1,9	
21 сут	31,6 ± 1,6	10,8 ± 0,5
Сульфат-ионы, мг/дм ³		
0 сут	45,4 ± 2,3	
21 сут	52,8 ± 2,6	23,4 ± 1,2
Фосфат-ионы, мг/дм ³		
0 сут	4,7 ± 0,2	
23 сут	4,3 ± 0,2	0,15 ± 0,03
1	2	3
Жиры и масла, мг/дм ³		
0 сут	3,5 ± 0,2	
24 сут	3,2 ± 0,2	Отсутствуют

* Контроль – исходный образец сточной воды;

** Образец – образец сточной воды с помещенной в нее эйхорнией.

ХПК и БПК определяли по методикам, изложенным в [12], остальные показатели определяли по методикам [13].

На следующем этапе исследований перед нами стояла задача определить основные показатели растительного материала, так как при производстве кормовой добавки большое значение уделяется показателям химического состава растений, на основании которого и судят о возможности его использования.

Из данных, представленных в табл. 4, видно, что растение богато каротином, сырой клетчаткой, протеином и, кроме того, не накапливает в своем составе радионуклидов, что соответствует литературным данным [5, 11].

Таблица 4

Химический состав растительной массы эйхорнии (в пересчете на сухое вещество)

Показатель	Значение показателя	
Влажность, %	25,00 ± 1,05	
Сырая зола, %	16,66 ± 0,82	
Сырая клетчатка, %	11,21 ± 0,56	
Каротин, мг/кг	69,68 ± 3,48	
Сырой жир, %	1,60 ± 0,08	
Сырой протеин, %	10,83 ± 0,54	
Удельная активность, Бк/кг	Цезий-137	10,50 ± 1,00
	Калий-40	437,40 ± 87,50
Растворимые углеводы, %	19,00 ± 0,95	

Для изучения изменения химического состава биомассы растения до и после очистки сточных вод были проведены исследования с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM 5610LV с системой электронно-зондового энергодисперсионного анализа (JEOL Ltd., Япония).

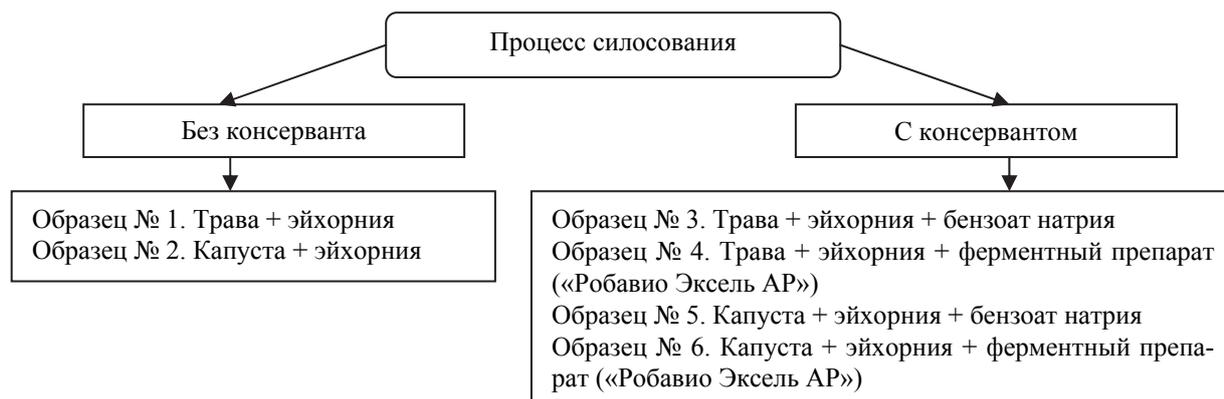


Рис. 3. Схема эксперимента

По результатам энергодисперсионного анализа было установлено, что до и после очистки сточных вод, состав биомассы растения остается неизменным.

Исходя из соотношения сахара к сырому протеину 1,7 : 1,0 можно сделать вывод, что эйхорния хорошо будет подвергаться силосованию [11].

Вся зеленая биомасса эйхорнии после очистки сточных вод с МОС была высушена при комнатной температуре. Известно, что данное сырье можно использовать в качестве кормовой добавки для сельскохозяйственных животных. Однако биомассу растения можно использовать для получения силоса. На рис. 3 представлена схема эксперимента по изучению процесса силосования с использованием биомассы растения.

Сухую кормовую добавку эйхорнии смешивали с различными компонентами, указанными на рис. 3 в такой пропорции, чтобы общая влажность смеси составляла 60%. Массу тщательно утрамбовывали и плотно закрывали в стеклянных емкостях с притертыми крышками, чтобы предотвратить контакт с воздухом. Емкости оставляли без доступа света при комнатной температуре. Оценку качества готового силоса производили не ранее чем через 30 сут после закладки сырья.

Наиболее важные для процесса силосования показатели исходного сырья, помещенного на силосование, приведены в табл. 5.

По окончании силосования проводили определение качества готового силоса по методикам, изложенным в [15–17]. Полученные результаты приведены в табл. 6.

Таблица 5
Показатели силосуемого сырья*

Показатель	Каротин, мг/кг	Сырой протеин, %	Сырая клетчатка, %
Образец № 1	20,30 ± 1,02	11,59 ± 0,64	6,98 ± 0,33
Образец № 2	21,78 ± 1,09	8,58 ± 0,43	7,53 ± 0,32
Образец № 3	19,90 ± 1,65	11,73 ± 0,65	6,79 ± 0,33
Образец № 4	20,10 ± 1,01	11,49 ± 0,57	7,06 ± 0,35
Образец № 5	21,63 ± 1,08	8,72 ± 0,44	7,36 ± 0,37
Образец № 6	21,29 ± 1,08	8,39 ± 0,42	7,81 ± 0,38

* Результаты представляют собой среднее арифметическое значение трех параллельных измерений одного эксперимента.

Образцы № 3, 4, 5 и 6 имели приятный, слегка кисловатый запах, напоминающий запах свежесквашенных овощей и фруктов. В них сохранилась структура растений, легко различались кусочки листьев, они эластичны и легко отделялись друг от друга. Это характеризует силос как доброкачественный. Пример такого силоса приведен на рис. 4.

Таблица 6

Показатели готового силоса

Показатель	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5	Образец № 6
Содержание сухого вещества, %	36,52 ± 1,83	59,30 ± 2,97	55,04 ± 2,75	48,69 ± 2,40	53,32 ± 2,67	47,22 ± 2,36
pH	7,50 ± 0,30	6,90 ± 0,30	4,20 ± 0,20	4,00 ± 0,20	3,90 ± 0,20	4,10 ± 0,20
Сырой протеин, %	14,54 ± 0,73	14,86 ± 0,74	12,80 ± 0,64	13,74 ± 0,68	11,61 ± 0,63	17,75 ± 0,95
Каротин, мг/кг	13,89 ± 0,69	9,49 ± 0,47	10,05 ± 0,05	20,19 ± 1,01	16,19 ± 0,81	4,85 ± 0,24
Сырая зола, %	15,22 ± 0,76	13,61 ± 0,68	14,23 ± 0,71	13,12 ± 0,66	13,99 ± 0,69	13,96 ± 0,69
Сырая клетчатка, %	4,34 ± 0,30	3,91 ± 0,20	6,92 ± 0,35	7,01 ± 0,35	7,64 ± 0,38	7,56 ± 0,38
Масляная кислота, %	Присутствует	Присутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Кормовые единицы	–	–	0,79	0,80	0,79	0,82
Обменная энергия, МДж	–	–	9,57	9,65	9,46	9,89



Рис. 4. Силос надлежащего качества

Образцы № 1 и 2 характеризовались наличием плесени и гнилостным запахом. Такой силос не может использоваться для скармливания животным.

Также было проведено определение обсемененности полученных образцов силоса. При высеве проб образцов № 3, 4, 5, 6 на питательные среды (среда Чапека, сусло агар, питательный агар) посторонней микробиоты (мицелиальных грибов, дрожжей) не обнаружено.

При высеве проб образцов № 1 и 2 на питательные среды наблюдалось массовое развитие дрожжей и мицелиальных грибов, что является недопустимым для доброкачественного силоса.

В результате комплексной оценки полученного силоса можно сделать вывод, что образцы № 3, 4, 5, 6 являются пригодными для кормления сельскохозяйственных животных и по своему качеству относятся к первому классу [14, 15].

Заключение. Проведенные литературные и экспериментальные изыскания подтвердили, что с помощью эйхорнии можно создавать низкочастотные водоочистительные системы. Биомассу растения, образующуюся при очистке сточных вод, можно использовать для получения высококачественного силоса.

Литература

1. Крот Ю. Г. Использование высших водных растений в биотехнологиях очистки поверхностных и сточных вод // Гидробиологический журнал. 2006. Т. 42, № 1. С. 76–91.
2. Кравец В. В., Бухгалтер И. Б., Акользин А. П. Высшие водные растения как элемент очистки промышленных сточных вод // Экология и промышленность России. 1999. № 8. С. 20–23.
3. Гарин В. М., Кленова И. А., Соукуп В. А. О возможности применения высшей водности растительности для очистки загрязненных вод // Безопасность жизнедеятельности. № 2. 2005. С. 32–35.

4. Эйхорния или водный гиацинт [Электронный ресурс] / Клуб «Дача-дача». URL: <http://dachadacha.ru/item/view/2634> (дата обращения: 07.11.2012).

5. Эйхорния – корм, биотопливо, удобрение [Электронный ресурс] / Пионер. URL: <http://pioneerllc.ru/eukhomiya.html> (дата обращения: 07.11.2012).

6. Эксперимент на Юбилейном. Воду будет чистить растение из тропиков [Электронный ресурс] / Экологический информационный центр Гродно и Гродненской области. URL: <http://green-grodno.info/3947> (дата обращения: 06.06.2013).

7. Использование эйхорнии для очистки проточек / Е. П. Курцевич [и др.] // Экология и промышленность России. № 2. 2001. С. 21–23.

8. Высшая водная растительность как элемент очистки промышленных сточных вод / В. В. Кравец [и др.] // Экология и промышленность России. № 8. 1999. С. 20–23.

9. Лю Хун, Лю Ин, Гу дин-фаэ Очистка сточных вод с помощью водных растений // Экология и промышленность России. № 2. 1999. С. 13–14.

10. Высшие водные растения для очистки сточных вод / Ю. А. Тарушкина [и др.] // Экология и промышленность России. № 5. 2006. С. 36–39.

11. Информационный обзор способа очистки (доочистки) вод с применением эйхорнии (водного гиацинта) [Электронный ресурс] / КФХ «Ессентуки». URL: <http://essentuki.com/index.html> (дата обращения: 09.09.2012).

12. Маркевич Р. М. Экологическая биотехнология. Лабораторный практикум по одноименному курсу для студентов специальности «Биоэкология». Минск: БГТУ, 1999. 65 с.

13. Основные методы обнаружения химических элементов в природных и сточных водах. Лабораторные работы по спецкурсу. Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2003. 30 с.

14. Корма и кормовые средства [Электронный ресурс] / GenDocs. URL: <http://do.gen-docs.ru/docs/index-321444.html> (дата обращения: 11.11.2012).

15. Силос из кормовых растений. Общие технические условия: СТБ 1223-2000. Введ. 22.05.00. Минск: БелГИСС, 2000. 16 с.

16. Корма. Методы определения аммиачного азота и активной кислотности (рН): ГОСТ 26180–84. Введ. 29.04.84. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. 8 с.

17. Корма грубые. Методы выделения микроскопических грибов: ГОСТ 18057–88. Введ. 01.01.90. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. 7 с.

Поступила 19.06.2013