

В продолжение экспериментальных работ по использованию целлюлозосодержащих отходов переработки сельскохозяйственного сырья в качестве сорбционных материалов (СМ) для удаления ионов тяжелых металлов (ИТМ) из водных сред [1, 2], исследована возможность удаления ионов железа (III) отходами льнопереработки. Сорбция ИТМ целлюлозосодержащими отходами переработки сельскохозяйственных культур - перспективное направление в области охраны водных ресурсов. В частности, работами отечественных и зарубежных исследователей проведены исследования по возможности удаления ионов Fe^{3+} из водных сред с использованием рисовой шелухи [3, 4], соломы злаковых культур [5], отходов от выжимки апельсинового сока [6], кожицей фасоли [7, 8] и др. Ранее сообщалось о возможности извлечения ионов $Zn(II)$ [9, 10], $Co(II)$ [11], $Cu(II)$ [12], $Cd(II)$ [10] и $Ni(II)$ [13] продуктами переработки льняного сырья. В настоящей работе исследовалась сорбция ионов $Fe(III)$ льняной кострой из модельных стоков. Первоначально строились изотермы сорбции ионов Fe^{3+} льняной кострой в нейтральной и кислой средах и определялась максимальная сорбционная емкость. В плоскодонные колбы емкостью 250 см³ помещались навески льняной костры массой по 1 г. Затем в колбы заливалось по 200 см³ растворов, содержащих ионы $Fe(III)$ в концентрациях от 20 до 4000 мг/дм³. В модельных растворах в качестве поллютанта использовался $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$. Навески сульфата железа (III) брались с учетом кристаллизационной воды. Колбы с находящимися в них навесками льняной костры и соответствующими растворами плотно закрывались пробками и энергично встряхивались в течение 3 часов. Затем реагент удалялся фильтрацией, а в фильтратах определялись остаточные концентрации ионов $Fe(III)$ согласно стандартной методики [14]. Из графиков изотерм сорбции (рис. 1) определено, что с увеличением концентрации ионов Fe^{3+} в растворе сорбционная ёмкость льняной костры линейно увеличивается. Рис. 1 - Изотермы сорбции ионов железа (III) льняной кострой в кислой и нейтральной средах. Проведенными исследованиями найдено, что максимальная сорбционная емкость по отношению к ионам $Fe(III)$ составляет: в кислой среде - 41,9 мг/г, в нейтральной среде - 47,9 мг/г, что несколько ниже таковых показателей, найденных для ионов Co^{2+} [11]. В дальнейшем определялось кинетика удаления ионов $Fe(III)$ с концентрацией 100 мг/дм³ в статических и динамических условиях из модельных растворов. Для проведения экспериментов в статических условиях в плоскодонные колбы емкостью 250 см³ помещались навески льняной костры по 0,1 г., что соответствовало содержанию последней в дозировке 1 г/дм³. В колбы приливалось по 100 см³ модельных растворов с концентрацией ионов Fe^{3+} 100 мг/дм³. Колбы с находящимися в них модельными растворами и навесками льняной костры плотно закрывались пробками и энергично встряхивались в течение 5 часов. Через определенные промежутки времени пробы отфильтровывались от исследуемого сорбционного материала, в фильтратах определялись остаточные концентрации исследуемых

ионов. Отмечено, что снижение концентрации ионов железа (III) происходит линейно с течением времени. Проведенными экспериментами определено, что остаточная концентрация последних в модельном растворе после 5 часов контактирования с реагентом составила: в нейтральной среде - 53,9 мг/дм³, в кислой среде - 97,1 мг/дм³, что соответствует значению сорбционной емкости 46,1 мг/г и 2,9 мг/г соответственно. Как видно из приведенных данных, в кислой среде сорбции ионов Fe(III) на поверхности льняной костры практически не происходит. Значения названного параметра, определенного в динамических условиях, несколько ниже: 40,9 мг/г - в нейтральной среде и 18,3 мг/г - в кислой среде. Для определения названных значений в сорбционные колонки набивалось по 5 г льняной костры и пропусклся раствор с концентрацией ионов Fe(III), равной 100 мг/дм³. Посредством дозатора устанавливался расход прохождения модельной сточной воды (СВ) через слой костры, равный 20 см³/мин; общий объем прошедшего раствора - 2,4 дм³. Через определенные промежутки времени определялись остаточные концентрации вышеназванных ионов в растворе, прошедшего через слой реагента. По полученным данным строились графики зависимости остаточной концентрации ИТМ в растворе после очистки от времени прохождения модельной воды через слой сорбционного материала в нейтральной и кислой среде. Тем не менее, как отмечалось выше, сорбционная емкость льняной костры по ионам Fe³⁺ невысока. В этой связи исследовалась возможность повышения сорбционных характеристик к названным ионам металла исследуемого СМ путем обработки последнего в потоке высокочастотной (ВЧ) плазмы пониженного давления. Для выявления наиболее подходящего режима обработки варьировались следующие параметры плазменной обработки: давление в рабочей камере плазмотрона (P) - от 13,3 до 26,6 Па, расход плазмообразующего газа (Q) - от 0,02 до 0,06 г/с, сила тока на аноде (I_a) - от 0,3 до 0,9 А, напряжение на аноде плазмотрона (U_a) - от 1,5 до 7,5 кВ, время обработки (T) - от 1 до 30 мин. Начальная концентрация ионов Fe³⁺ в модельном растворе составила 300 мг/дм³. Первоначально исследовалась зависимость поглотительной способности костры от природы плазмообразующего газа. В качестве последних использовались воздух, аргон, смеси аргона с воздухом и аргона с пропаном в соотношениях 70:30. Гистограммы зависимости количества ионов Fe(III), сорбированных образцами костры после плазмообработки, приведены на рис. 2. Одновременно, при прочих равных параметрах, варьировалось давление в рабочей камере (13,3 и 26,6 Па). Как видно из гистограмм, приведенных на рис. 2а, при давлении в рабочей камере плазмотрона 13,3 Па обработка костры плазмой в среде аргона приводит к наибольшему значению сорбционной емкости по отношению к ионам Fe(III). При давлении в рабочей камере плазмотрона, равной 26,6 Па, наибольшие значения сорбционной емкости наблюдаются для образцов костры плазмообработанных в атмосфере аргона с воздухом и аргона с пропаном. В

связи с вышеизложенным, в дальнейшем производилась обработка льняной костры ВЧ плазмой при пониженном давлении (26,6 Па) с варьированием параметров в среде аргона и смеси аргона с воздухом. а б Рис. 2 - Зависимости сорбционной емкости плазмообработанных образцов льняной костры по ионам железа (III) в зависимости от вида и давления с расходом плазмообразующего газа а) $P=13,3$ Па и $Q=0,02$ г/сек; б) $P=26,6$ Па и $Q = 0,06$ г/сек Первоначально изучалось влияние анодного напряжения на аноде плазмотрона на сорбционную емкость льняной костры по отношению к ионам Fe(III). Гистограммы количества последних, поглощенных образцами костры после плазмообработки, в зависимости от значений U_a и вида плазмообразующего газа, приведены на рис. 3. Найдено, что увеличение значений U_a приводит к проявлению экстремальных зависимостей. Так, например, при плазмообработке в среде аргона сорбционная емкость костры по отношению к ионам Fe^{3+} с увеличением анодного напряжения до 2 кВ повышается, затем понижается. Как следует из приведенных гистограмм (рис. 3), плазмообработка в среде аргона приводит к несколько большему значению сорбционной емкости льняной костры по ионам железа по сравнению с образцами, обработанными в среде аргона. В дальнейшем исследовалось влияние силы тока на аноде плазмотрона на сорбционные характеристики исследуемого СМ. Гистограммы зависимости последних в зависимости от вида плазмообразующего газа и силы тока приведены на рисунке 4. а б Рис. 3 - Значения сорбционной емкости плазмообработанных образцов льняной костры по ионам железа (III) в зависимости от напряжения на аноде и плазмообразующего газа: а) в атмосфере аргона; б) в атмосфере аргона с воздухом а б Рис. 4 - Зависимости значений сорбционной емкости льняной костры по ионам железа от силы тока и вида плазмообразующего газа: а) в атмосфере аргона; б) в атмосфере аргона с воздухом Как следует из приведенных на рис. 4 данных, наибольшее значение сорбционной емкости достигается для образцов, обработанных ВЧ плазмой пониженного давления в среде аргона при силе тока на аноде плазмотрона $I_a = 0,5$ А. Зависимости показателя сорбционной емкости для исследуемого СМ по ионам Fe^{3+} в зависимости от времени плазмообработки приведены на рис. 5. а) б Рис. 5 - Значения сорбционной емкости образцов льняной костры по ионам железа (III) в зависимости от времени плазмообработки и вида плазмообразующего газа: а) в атмосфере аргона; б) в атмосфере аргона с воздухом Как следует из приведенных на рис. 5 гистограмм, увеличение времени обработки плазмой в среде аргона приводит к экстремальным зависимостям: сначала значение сорбционной емкости несколько повышается, далее - несколько понижается. Плазмообработка костры в среде аргона с воздухом приводит к несколько иной картине: с увеличением времени нахождения образцов исследуемого СМ в рабочей камере плазмотрона значение сорбционной емкости несколько повышается. Тем не менее, следует отметить,

что варьирование показателей плазмообработки не приводит к значительным изменениям сорбционных показателей льняной костры по ионам Fe(III) как, например, при сорбции ионов Co(II) [11]. Проведенными экспериментами найдено, что наибольшее значение сорбционной емкости по ионам железа достигается при обработке льняной костры ВЧ плазмой пониженного давления при следующих показателях: плазмообразующий газ - аргон, $P = 26,6$ Па, $I_a = 0,5$ А, $U_a = 1,5$ кВ, $T = 10$ мин.