

Введение Как показано в ряде работ [1], эффективным методом придания бактерицидности меховому материалу является нанесение на него наночастиц серебра с помощью ВЧ плазмы пониженного давления. При нанесении покрытия функциональное назначение плазмы состоит в активации наночастиц, транспортировке их к поверхности образца, выносе с поверхности слабо адсорбированных и укреплении хорошо адсорбированных частиц, которые и образуют в конечном итоге покрытие. Механизм активации наночастиц, их распределения и фиксации на поверхности меховых материалов исследованы недостаточно. В связи с этим разработана математическая модель взаимодействия наночастиц серебра с потоком плазмы ВЧИ разряда пониженного давления.

1. Экспериментальная часть Для модификации меховых материалов в работе использовали ВЧИ плазменную установку для нанесения наноматериалов на поверхность меха. Входные параметры плазменной установки варьировались в следующих пределах: мощность разряда (W_p) 0,5-2,0 кВт, рабочее давление в разрядной камере (P) 13,3-30 Па; расход плазмообразующего газа (G) 0,04-1,2 г/с; частота генератора (f) 1,76 МГц, продолжительность обработки (t) 1-10 мин. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон. Для обеспечения натуральным меховым материалам бактерицидных свойств применялись наночастицы серебра (коллоидный раствор). Напыляемые наночастицы вводятся в плазму при пропускании плазмообразующего газа через барботер, в котором находится коллоидный раствор серебра.

2. Результаты и их обсуждение Концентрация наночастиц Ag^+ в растворе не превышает 10^5 1/м³, что на 17-18 порядков меньше концентрации атомов в плазмообразующем газе и на 13-14 порядков меньше концентрации электронов и ионов в плазме. Поэтому достаточно рассмотреть процесс взаимодействия с плазмой одной наночастицы, без учета влияния других наночастиц. В одной наночастице содержится от 10^3 - 10^4 атомов и ионов серебра. Время пролета наночастицы серебра от входного отверстия плазмотрона до поверхности меха составляет $\sim 10^{-3}$ с, или $\sim 10^3$ периодов колебания электромагнитного поля. Концентрация электронов и ионов в плазме ВЧИ разряда пониженного давления составляет 10^{15} - 10^{18} 1/м³, что соответствует наличию в объеме радиусом $\sim 10^{-6}$ - 10^{-5} м одной заряженной частицы (электрона или иона). Длина свободного пробега электронов составляет $\sim 10^{-3}$ м, ионов - 10^{-4} м. Это означает, что за один период колебания электромагнитного поля сквозь этот объем пролетает $\sim 10^2$ - 10^3 электронов и ~ 10 - 10^2 ионов. Без учета кулоновского взаимодействия вероятность столкновения электрона с наночастицей за один период колебания поля составляет величину $\sim 10^{-4}$ - 10^{-3} , иона $\sim 10^{-5}$ - 10^{-4} , или за время пролета наночастицы до поверхности меха $\sim 10^{-1}$ - 1 для электрона и $\sim 10^{-2}$ - 10^{-1} для иона. Наночастица, поступающая в плазму, заряжена положительно, так как образована в результате «объединения» ионов, содержащихся в растворе.

Общий заряд частицы составляет $\sim 1,6 \cdot 10^{-16} - 5 \cdot 10^{-17}$ Кл. При рекомбинации электрона с ионом Ag^+ выделяется энергия 7,5 эВ, которая почти в 3 раза больше энергии, необходимой для испарения атомов Ag с поверхностью. В связи с этим возникает вопрос о состоянии наночастицы в момент взаимодействия ее с поверхностью меха. Представленная модель описывает взаимодействие ВЧ плазмы пониженного давления с наночастицами серебра, приближенно, на качественном уровне. Для того, чтобы понять, как именно взаимодействует поток низкоэнергетичных ионов с поверхностью полимера, необходимо провести более точные количественные оценки с помощью математической модели. Моделировался равномерный поток электронов, пролетающий через элементарную ячейку, в которой находится положительно заряженная наночастица серебра. Общий заряд (Q) частицы составляет: где e – элементарный заряд, r_{Ag^+} – радиус иона серебра; R – радиус частицы; квадратные скобки означают математическую операцию взятия целой части. В одной наночастице содержится примерно частиц серебра: где r_{Ag} – радиус атома серебра. Концентрация электронов и ионов в плазме ВЧИ разряда пониженного давления составляет $10^{15}-10^{18}$ 1/м³, что соответствует наличию в элементарной ячейке со стороной $10^{-6}-10^{-5}$ м одной заряженной частицы (электрона или иона). За один период колебания электромагнитного поля сквозь элементарную ячейку пролетает $\sim 10^2-10^3$ электронов. Для каждого электрона рассчитывалась траектория путем решения системы уравнений где m_e – масса электрона; V_e – скорость электрона; R_e вектор радиус положения электрона относительно наночастицы; $E = E_p + E_{rf}$ – напряженность полного электрического поля в окрестности наночастицы; E_{rf} напряженность высокочастотного электрического поля; E_p – напряженность потенциального электрического поля, создаваемого зарядом наночастицы: Система (3), (4) решалась с начальными условиями В результате моделирования установлено, что в течение 20-30 периодов колебания электромагнитного поля происходит полное распыление наночастицы на атомы Ag и ионы Ag^+ . Поскольку время пролета наночастицы серебра от входного отверстия плазмотрона до поверхности меха составляет $\sim 10^{-3}$ с, или $\sim 10^3$ периодов колебания электромагнитного поля. Поэтому, напыление серебра на поверхность меха происходит из атомарно-ионного потока по такому же механизму, что и обработка ионами плазмообразующего газа [2, 3]. Это обеспечивает возможность равномерного распределения серебра на поверхности мехового полуфабриката и его фиксации путем образования комплексных соединений серебра с аминокислотами белков коллагена и кератина за счет вытеснения водорода карбоксильной группы и координационной связи иона серебра с азотом (рис. 1, 2). Рис. 1 - Схема распада наночастиц серебра на отдельные фрагменты Рис. 2 - Схема образования комплексных соединений серебра с белками На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы: 1. В результате проведенных

теоретических исследований разработаны физическая и математические модели взаимодействия наночастиц серебра, напыляемых на волосяной покров мехового материала в условиях ВЧИ плазмы пониженного давления. 2. Результаты теоретических исследований, полученные с помощью разработанных физической и математической моделей показали, что частицы серебра напыляются в виде атомарно-ионного потока, что обеспечивает эффективное адсорбирование их на поверхности мехового полуфабриката.