

В работе [1] приводились результаты анализа процесса нанесения покрытия на подложку в центробежном поле. Рассматривалась задача растекания капли аномально-вязкой жидкости, реологическое уравнение состояния которой представляет собой степенное соотношение, в криволинейной системе координат (l, φ, z) , вращающейся вместе с подложкой: , (1) , (2) . (3) Здесь - проекции единичных массовых сил по осям, - проекции скоростей по осям, p - давление, ρ плотность жидкости, μ - вязкость жидкой среды, t - время. После принятия ряда упрощающих допущений и перехода к плоской подложке, которая чаще используется на практике, получены уравнения для определения толщины слоя жидкости на подложке и радиуса смоченного пятна : ; (4) (5) Здесь K и n - реологические константы жидкости, V - объем капли. Далее в работе [1] был рассмотрен и альтернативный подход по определению h и R . Было принято, что размеры подложки достаточно велики, растекание капли быстро прекращается, приобретая равновесную форму. С учетом условий равновесия - условия потенциальности силового поля Эйлера, условия Лапласа по перепаду давления на поверхности раздела жидкость-газ и условия Дюпре-Юнга на линии контакта трех фаз, - было получено уравнение: , (6) где $A = \frac{2\sigma}{r_0}$. Здесь θ - краевой угол смачивания, σ - коэффициент поверхностного натяжения, Наибольшая однородность покрытия обеспечивается в случае, если при кривизна свободной поверхности пленки равна нулю. Для этого случая задача сведена к алгебраическим уравнениям: ; (7) , (8) с помощью которых определяется толщина равновесной пленки и радиус смоченного пятна. Однако, на практике процесс растекания сопровождается и другими физико-химическими процессами, например испарением растворителя, адсорбцией молекул жидкости поверхностью подложки и т.д., которые в работе [1] не учитывались. Между тем при испарении растворителя происходит теплообмен между пленкой жидкости и окружающим воздухом, что приводит к возникновению градиентов температуры и концентрации в пленке жидкости; меняются объем и физические свойства жидкости, которые влияют на процесс растекания и на параметры пленки, соответствующие равновесному состоянию. Остановимся на процессах, сопровождающих процесс испарения растворителя. Пусть X_0 - начальная объемная концентрация растворителя в капле жидкости; X - концентрация в произвольном сечении пленки, отстоящем от оси вращения на расстоянии r ; - объемный расход жидкости через начальное сечение растекающейся капли; - объемный расход жидкости через сечение, находящееся на расстоянии r ; следовательно, - количество растворителя, проходящего через начальное сечение, - количество растворителя, проходящего через произвольное сечение. Тогда изменение расхода растворителя на бесконечно малом расстоянии от произвольного сечения можно записать двумя равенствами (способами): , (9) , (10) где β - коэффициент массоотдачи газовой фазы, ρ_g - плотность легколетучего растворителя. Знак минус в уравнении (10) связан с уменьшением расхода

жидкости по r из-за испарения. Приняв $\gamma = \text{const}$ и опустив в уравнении (9) из-за малости слагаемое $\frac{1}{2} \frac{d\gamma}{dr}$, интегрируя уравнение (9) в пределах от r_0 до r и от X_0 до X , а уравнение (10) в пределах от r_0 до r и от 0 до r , и получим зависимости: (11), (12) позволяющие при известных начальных условиях (r_0, X_0), коэффициента массоотдачи определить объемный расход жидкости и концентрацию X через произвольное сечение пленки. Выполним анализ по определению радиуса r_k , на котором достигается полное испарение легколетучего растворителя, т.е. $X = 0$. Запишем уравнение массоотдачи (испарение растворителя) через свободную поверхность пленки жидкости. Молекулярный поток массы имеет вид: (13) где ρ_v и ρ_g - концентрация паров растворителя в газовой фазе на границе раздела фаз и на большом удалении от пленки. В результате испарения растворителя происходит охлаждение пленки. Соответствующая плотность теплового потока к окружающему воздуху имеет вид: (14) где $q_{\text{исп}}$ - удельная теплота испарения легколетучего компонента. Поскольку при испарении растворителя пленка жидкости охлаждается, возникает встречный поток тепла от воздуха к охлаждаемой жидкости: (15) где $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{возд}}$ - температура на свободной поверхности пленки и температура воздуха на большом удалении от поверхности пленки; α_g - коэффициент теплоотдачи в газовой фазе. Так как тепловой поток вызван тепловым потоком $q_{\text{исп}}$, очевидно, всегда выполняется условие: (16) Под воздействием этих тепловых потоков будут развиваться в пленке диффузионный и тепловой пограничные слои, имеющие начальные участки; область диффузионной и термической стабилизации; область стабилизированного массообмена, где градиент концентрации сохраняет постоянное значение по толщине пленки и зависит только от температуры поверхности пленки; область термической стабилизации, в которой и процессы тепло-, и массообмена протекают при постоянной температуре. Уравнения диффузионный и тепловой пограничных слоев имеют аналогичный вид: (17), (18) где D и λ - коэффициенты диффузии и температуропроводности. Граничные условия в каждой из названных областей нетрудно определить и тогда задачу можно решать численными методами. С целью упрощения задачи примем, что температура на поверхности пленки жидкости мгновенно принимает равновесное значение $X_{\text{пл}}$, при котором суммарный тепловой поток через границу раздела фаз становится равным нулю: $q_{\text{исп}} = 0$ (19) Зависимость (19) отражает условие адиабатического испарения [2]. При подстановке в (19) тепловых потоков, определяемых соотношениями (15) и (14) получим: (20) Так как в нашем случае подложка вращается в открытом воздухе, можно принять $T_{\text{возд}} = T_{\text{окр}}$ - равновесная концентрация (концентрация насыщенного пара легколетучего компонента), соответствующая температуре $T_{\text{окр}}$. Для определения функции $X(r)$ было использовано уравнение состояния, в котором парциальное давление легколетучего компонента определялось с использованием эмпирического уравнения Антуана. Тогда уравнение (20) примет вид [3,4]. (21) где $P_{\text{окр}}$ - газовая постоянная; константы

входящие в уравнение Антуана протабулированы для широкого класса жидкостей. Для процесса испарения отношение коэффициентов теплои массоотдачи является функцией числа Льюиса. Так, по Касту-Кришеру [5]: (22) где h - коэффициент температуро-проводности и молекулярной диффузии в газовой фазе; ρ - среднее значение произведения удельной теплоемкости на плотность в газовой фазе; ρ_0 - в покоящейся среде; при ламинарном и при турбулентном пограничном слоях в газе. В большинстве случаев близко к 1. Подставляя (22) в (21), для равновесной температуры поверхности пленки получим выражение: (23) В.Ф. Дунский с соавторами [6], базируясь на формуле В.Г. Левича по испарению чистой (однокомпонентной) жидкости на вращающемся диске, (24) проводив опыты по испарению этилового спирта, ацетона, бензола, считая процесс испарения изотермичным, происходящем при температуре окружающего воздуха, получили выражение для определения радиуса r , на котором достигается полное испарение (высыхание) жидкости на подложке: (25) Концентрация паров вычислялась при температуре окружающего воздуха. Радиус высыхания рассчитывался нами по формуле (25), но с учетом, что поверхность пленки при испарении охлаждается до равновесной температуры. Вычислив по уравнению (23), для каждого растворителя находили концентрацию паров ρ и, подставив ее вместо в уравнение (25), получили радиус высыхания r . Температура для всех рассматриваемых жидкостей была значительно ниже температуры воздуха и находилась в области отрицательных значений по шкале Цельсия. Отношение экспериментальных и расчетных радиусов высыхания по работе [6] составляло 0,58, а в нашем случае 1,075. Небольшое отклонение их в нашем случае объясняется тем, что температура устанавливается не сразу и более точным был бы расчет, учитывающий тепловые и диффузионные пограничные слои в жидкой пленке. Однако, как видно, этим отличием можно пренебречь. Когда процесс испарения рассматривается применительно к капле, принявшей равновесную форму, целью анализа становится определение времени, в течении которого растворитель испарится из капли. Для этого, используя уравнение (24), получим следующее выражение для определения времени испарения: (26) Полученные расчетные соотношения могут быть использованы при расчете центробежных пленочных тепломассообменных аппаратов. Центробежная сила может быть использована для интенсификации разнообразных технологических процессов, например [8-10].