

Для повешения удельной производительности технологических аппаратов довольно часто используется подвод внешней энергии в виде центробежной. Центробежные аппараты широко применяются в промышленности для проведения разнообразных гидромеханических, тепло- и массообменных процессов [1-4]. В той работе рассмотрим случай, когда в аппарате реализуется тонкая центробежная ламинарная пленка со свободной поверхностью. Ротор этих аппаратов, состоящий из вала и рабочей насадки, изготавливается в виде плоского диска, конуса, сферы или иной криволинейной чаши или их комбинаций. Обрабатываемая жидкость, характеризующиеся различными реологическими свойствами, обычно подается в центр рабочего элемента – насадки или необходимый расход обеспечивается погружной частью насадок в жидкость. Рассмотрим законы сохранения импульса в центробежной жидкой пленке. Вязкие (ньютоновские) жидкости Изучению пленочного течения вязкой жидкости по открытой гладкой поверхности вращающегося плоского диска и конуса посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ. В работе [5] в одномерной постановке определены среднее значение меридиональной скорости и толщины пленки жидкости. Аналогичная задача для плоского диска была решена в работе [6]. Влияние давления и поверхностного натяжения на процесс течения жидкости по конусу было проанализировано в работе [7]. При больших расходах маловязкой жидкости по поверхности ротора возникает значительное ее отставание. Этим вызвано появление работ в двумерной постановке. В работе [8] в приближенной постановке решена двумерная задача для плоского диска. Аналогичная задача решена в работе [9], предложенные в ней зависимости справедливы для больших радиусов. Наиболее полное изучение течения вязкой жидкости по поверхности плоского диска и конуса было выполнено К.В. Вацагиным [10]. Им учтены, кроме центробежной силы и силы вязкостного трения, также силы Кориолиса и давление. Получены выражения для меридиональной скорости, скорости отставания, а также распределение давления по длине образующей. Они подтверждены экспериментальными данными автора. Однако необходимо подчеркнуть, что в вышеперечисленных работах рассматривался случай безволнового ламинарного течения вязкой жидкости. Авторы работы [11] решают двумерную задачу ввода в профиль радиальной скорости безразмерной квазифункции тока. Задача сводится к определению некоторого симплекса, с помощью которого определяются все параметры течения. Авторы также выявили максимально возможный расход жидкости, подаваемой на диск, отвечающий условию «захлебывания» диска. Интересны работы, посвященные исследованиям особенностей гидродинамики перехода ламинарного течения в турбулентное. В работе [12] с помощью коалинового метода обнаружили на поверхности диска в области $Re=(1,9-3,0) \cdot 10^5$ ряд треков в форме архимедовой спирали. Авторы предположили, что в центральной части диска существует ламинарный режим течения, а затем

течение становится неустойчивым. Устойчивость пленочного течения вязкой жидкости на поверхности вращающегося диска была предметом исследования работ [12-13]. Были получены аналитические выражения, позволяющие определить границы устойчивости в зависимости от параметров течения. Изучение переходного режима течения на вращающемся диске было выполнено в работе [14]. Аналогичные исследования были выполнены авторами работы [15]. Авторы выделяют четыре зоны по радиусу вращающейся насадки: входная, первая ламинарно-волновая, турбулентная, ламинарно-волновая зона с мелкомасштабными возмущениями поверхности. Предложены аналитические зависимости для пределов зон. Влияние газового потока на характеристики жидкой центробежной пленки анализируется введением касательного напряжения на поверхности пленки в работе [16]. В центробежных пленочных аппаратах жидкость обычно в виде струи подается в центр рабочего элемента. В приосевой области складывается сложная трехмерная гидродинамическая обстановка. В приосевой области (ударная зона) конвективные члены в уравнениях Навье-Стокса играют определяющую роль, а влияние центробежной силы на процесс постепенно нарастает от оси к периферии. Возникает проблема определения длины начального участка, когда гидродинамический пограничный слой полностью заполняет поперечное сечение потока. Вопросу определения длины начального участка L_n посвящен ряд работ. В работе [17] длину начального участка L_n предполагают определить в виде: $L_n = \frac{Q}{\nu \omega}$, (1) где Q - объемный расход жидкости, ν - кинематическая вязкость жидкости, ω - параметр, ω - угловая скорость вращения ротора. Однако как определить параметр неизвестно. Авторы [18] определяют границу начального участка следующим образом: $L_n = \frac{Q}{\nu \omega}$. (2) Определению длины начального участка была посвящена работа [19], (3) где δ - толщина пленки. Анализ этого уравнения позволил установить, что на безразмерном радиусе и далее все интегральные кривые полученные при различных начальных условиях, вырождаются в одну амплитуду, совпадающую с графиком Хинце-Мильборна. Это означает, что при заканчивается начальный участок. Численно определение L_n по работам [18] и [19] совпадают. Это тем более интересно, что выводы в работе [18] были получены в результате оценки значимости членов исходного уравнения, а в [19] – путем прямого численного анализа. Длина начального участка L_n была определена и для неподвижной насадки [20, 21]. Поскольку на начальном участке действие центробежной силы мало по сравнению с силой инерции, то результаты работ [20, 21] могут быть использованы для предварительной оценки гидродинамической ситуации. Подчеркнем, что работ, посвященных экспериментальному определению L_n в известной нам литературе нет. Течение тонких пленок вязкой жидкости по криволинейным вращающимся поверхностям было рассмотрено в работе [22]. Изучено стационарное течение жидкости при больших числах Экмана. Рассмотрена возможность получения пленки заданной толщины, ее

устойчивость и возникновение на ее поверхности нелинейных волн. Показано, что течение жидкости на криволинейной поверхности более устойчиво, чем по плоскому диску. Неустойчившееся течение тонкого слоя вязкой жидкости по поверхности тела вращения, вращающейся с переменной угловой скоростью вокруг своей оси, при наличии внешней массовой силы, действующей вдоль оси тела рассмотрена в работе [23]. Задача решалась при начальных условиях, учитывающих распределение толщины слоя и скоростей в начальный момент времени. Исследование течения вязкой жидкости по поверхности вращающегося перфорированного конического диска выполнено в работе [24]. Система уравнений Навье-Стокса решается в двумерной постановке с учетом центробежных и Кориолисовых сил, однако без учета давления. Анализ работ в ламинарной постановке приведен и в работах [19, 25]. В экспериментальных работах, посвященных пленочному течению сплошной пленки по поверхности вращающегося диска, отмечается волнообразование [14,26,27] и переход ламинарного движения в турбулентное [15]. В работе [27] разработана номограмма определения средней толщины жидкой пленки в зависимости от определяющих параметров. Авторы работы [15] для характеристики перехода от ламинарно-волнового течения пленки к турбулентному предлагают использовать приведенное число Рейнольдса Re_p , учитывающее влияние газового потока и центробежное число Вебера $We_{цб}$. Изотермическое стабилизированное турбулентное течение вязкой жидкости при $L > L_n$ на поверхности вращающейся насадки в виде тонкой открытой сплошной пленки было изучено в работе [28]. Была рассмотрена криволинейная чаша в виде поверхности вращения второго порядка. Форма поверхности задается через $\sin$ и $\cos$. Турбулентность течения жидкости была принята в виде полуэмпирической теории Прантля. Как показывают расчеты для стабилизированного участка ($L > L_n$) скорость отставания жидкости значительно меньше меридиональной. Поэтому авторами работы было принято в виде (4) Двумерные уравнения движения Навье-Стокса свели к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которые решались численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Определялись основные технологические параметры течения в безразмерных величинах. В работе обсуждаются различия между разными режимами течения. В некоторых центробежных пленочных аппаратах расход жидкости обеспечивается частично погруженными в жидкость коническими насадками, например аппараты Киршбаума-Штора, Р.Ш. Сафина и т.д. [29]. Ряд работ посвящен проблемам увлечения жидкой пленки вращающимися дисками [30-34]. В этих работах определены кинематические соотношения для определения контура свободной поверхности, предложены условия сшивки двух зон, рассчитаны профили скоростей как в зоне статического мениска, так и в динамической зоне. В данных работах считается, что количество увлекаемой телом жидкости полностью определяется процессами, протекающими выше

уровня горизонтальной поверхности. Экспериментальные работы [35, 36] подтвердили зависимость расхода от глубины погружения усеченного конуса в жидкость. Первые попытки теоретического анализа закономерностей работы аппарата с коническим, частично погруженным в жидкость, ротором имеются в работах [37-39]. Методом Кармана рассчитан пограничный слой на погруженной части конуса. Расчетные формулы получены в предположении постоянства толщины пограничного слоя. Экспериментально была выявлена зона перехода ламинарного режима в турбулентное. Однако решения полученные в работах [37-39], неоднозначно учитывают глубину погружения конуса и не объясняют факт отсутствия подъема жидкости при угловой скорости вращения, ниже некоторого критического значения. Расчет насосного эффекта вращающегося усеченного конуса, частично погруженного в вязкую жидкость в ламинарной и турбулентной постановке был выполнен в работе [40]. Были определены толщины пограничного слоя и профили скоростей и на их базе рассчитана производительность погружной части конуса: . (5) Предельная толщина слоя на свободной поверхности жидкости s , которая может подняться центробежной силой, определяется . (6) Возможность насосного эффекта определяется соотношением: . (7) Турбулентный режим проанализирован на примере эмпирического соотношения «одной седьмой», которые с удовлетворительной точностью описывает поведение жидкости в окрестностях вращающегося конуса. Переход к турбулентному режиму течения сопровождается резким ростом расхода жидкости, понимаемый коническим ротором. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными данными [41-42]. Неньютоновские жидкости Многие жидкости, обрабатываемые в центробежных пленочных аппаратах, являются реологическими средами. Для описания деформационного поведения вязких неньютоновских жидкостей широко применяется «степенной закон». Ламинарное течение степенной жидкости по поверхности плоского диска в одномерной постановке было рассмотрено в работе [43]. Были получены зависимости для определения профиля меридиональной (радиальной) скорости и толщины пленки жидкости. В работах [44-47] была решена аналогичная задача для случая, когда рабочий элемент задан в виде криволинейной вращающейся чаши типа , в специальной вращающейся ортогональной системе координат в одномерной и двухмерной постановках. Были определены тангенциальные и меридиональные скорости, давление и толщина пленки. Установлен безразмерный параметр по которому можно определить течение одномерное или двумерное. Как известно, степенной закон не описывает кривую течения полностью, а только среднюю (вторую зону) часть. Для уравнения состояния Кросса, описывающего все три зоны кривой течения, было проведено решение одномерной задачи численным методом [40]. Осесимметричное установившееся течение нелинейной упруго-вязкой жидкости, подчиняющейся реологическому закону: (8) было рассмотрено в работах [49-52]. Здесь - тензор вязких

напряжений, p - давление, μ - единичный тензор, η - эффективная вязкость, β - коэффициент нормальных напряжений, γ_{ij} - тензоры Уайта-Метцнера. Коэффициент нормальных напряжений был определен из данных вискозимметрических исследований по методу Малкина. Была изучена одномерная и двумерная задачи, с учетом инерционных сил и без них. Использование метода интегральных соотношений позволило получить инженерные расчетные соотношения. Разрыв центробежной пленки аномальновязкой жидкости, подчиняющейся степенному закону был рассмотрен в работе [53]. Определены параметры процесса разрыва и минимальной плотности орошения вращающейся насадки на базе энергетической и моментной теорией. Определен параметр β . Если $\beta > 1$, следует пользоваться формулами, полученными из энергетической теории, если $\beta < 1$ - формулами из моментной теории. Экспериментальные исследования по определению критического радиуса разрыва показали, что отклонение теории от эксперимента составляет в основном 25-30%. Разрыв пленки жидкости сопровождается образованием поверхностных струй. Распад этих струй на капли на краю центробежной насадки рассмотрен в работе [54]. В работе [55] разработана математическая модель движения концентрированной двухфазной сред по поверхности ротационного смесителя. Решение этой задачи позволило выбрать оптимальные размеры элементов ротора. В работах [56-57] построена математическая модель течения степенной жидкости по внутренней поверхности вращающегося проницаемого конического ротора. Задача решена в трехмерной постановке. Автор установил закон изменения коэффициента проницаемости стенки конического ротора по длине образующей. Исследование процесса течения степенной жидкости по внешней поверхности криволинейной насадки выполнено в работе [58]. Получены безразмерные функции для определения меридиональной, осевой и тангенциальной компонент скорости, давления и толщины пленки. Полученные результаты были использованы при анализе процесса разделения тонкодисперсных суспензий. В работе [59-60] процесс течения степенной жидкости по внутренней проницаемой поверхности произвольной формы. Разработан алгоритм и программа численного решения полных трехмерных уравнений движения. Установлены условия получения монодисперсных гранул. В работе [61] найдена радиальная координата пространственного пограничного слоя по поверхности пленки, что позволяет конструировать конические насадки, работающие без «захлебывания» при любом расходе степенной жидкости. Математическая модель течения жидкости по внутренней поверхности усеченного конуса записаны в приближении пограничного слоя. Течение двух несмешивающихся степенных жидкостей по внутренней поверхности конической насадки рассмотрено в работе [62-63]. Теоретическому и экспериментальному изучению течения вязко - пластических сред по поверхности вращающихся дисков посвящены ряд работ [64-67]. Вязко-пластичные среды обычно высоковязкие,

поэтому задача решена в одномерном приближении. Получены параметры процесса течения, в частности, радиус формосохранения в виде: r_0 , (9) где σ - предельное напряжение сдвига. Существование радиуса формосохранения обусловлено наличием относительного равновесия между σ и напряжением, вызванным центробежной силой. Это обстоятельство позволило авторам работы [68] предложить центробежный метод определения реологических свойств вязкопластических сред. В заключении отметим, что исследование центробежной жидкой пленки сводится к определению поля скоростей, давлений и толщины пленки, которые необходимы для анализа, гидромеханических, тепло- и массообменных процессов, происходящих в центробежных пленочных аппаратах. Исследования центробежной жидкой пленки в изотермических условиях, приведенных в настоящей работе, являются отправной (начальной) точкой при анализе неизотермических задач.