

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ (ПРЕДЕЛЬНОЙ) ТОЛЩИНЫ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ НА ЛОПАСТИ ВЕРНОГО РОТОРНО-ПЛЕНОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Э.И. Баранов, ст. преподаватель;

С.И. Якушко, канд. техн. наук, доцент,

Сумский государственный университет, г. Сумы

Проведен анализ областей применения и принципа работы роторных пленочных аппаратов. Рассмотрены закономерности растекания жидкости по поверхности твердой вращающейся лопасти. Получена теоретическая зависимость для расчета геометрических параметров (толщины и ширины) жидкой пленки на лопастях верного роторно-пленочного устройства.

Ключевые слова: растекание жидкости, вращающаяся лопасть, пленка, капли.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде производств широко используются роторные пленочные аппараты, которые можно разделить на две основные группы. К первой относятся аппараты, в которых тепло- и массообмен и химические превращения происходят в тонком слое жидкости, создаваемом на внутренней поверхности неподвижного корпуса с помощью вращающегося лопастного ротора. Ко второй относятся аппараты, в которых процессы переноса осуществляются в тонком слое жидкости, движущейся под действием центробежной силы по внутренней поверхности вращающихся конусов, цилиндров, спиралей или дисков. К этой же группе относятся аппараты с разбрызгивающим жидкость ротором.

К последнему типу аппаратов относится верное роторно-пленочное устройство (ВРПУ) для тепло- и массообменных аппаратов, разработанное на кафедре ПОХНП СумДУ. Данное устройство имеет очень широкую область применения: в химической промышленности для проведения процессов абсорбции, ректификации, экстракции, распылительной сушки, очистки газов, скоростного смешения жидкостей, химических реакций в системах «жидкость-жидкость» и «газ-жидкость», нефтехимической промышленности при распыливании жидкостей в аппаратах вакуумной ректификации, металлургической промышленности для очистки выхлопных газов от сернистых и фтористых соединений и от пыли, в энергетике для распыливания и сжигания жидкого топлива в топках и газотурбинных двигателях, в сельском хозяйстве для высокопроизводительного опрыскивания растений растворами удобрений и ядохимикатов, в коммунальном хозяйстве для распыливания жидкости в кондиционерах, для ликвидации смога, очистки воздуха и создания искусственного микроклимата на улицах больших городов и на территории промышленных предприятий.

Такой широкий спектр использования ВРПУ говорит о высокой эффективности и неприязательности работы данного устройства при работе с загрязненными жидкостями и газами. Однако процесс растекания и распада струи жидкости при ее движении по вращающейся лопасти еще недостаточно изучен. Нами предпринята попытка провести описание процесса преобразования струи жидкости в пленку на лопастях верного роторно-пленочного устройства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Верное роторно-пленочное устройство представляет собой (рис. 1) цилиндрическую корзину 1, на боковой поверхности которой вдоль вертикальных рядов отверстий 2 установлены радиальные лопасти 3.

Корзина имеет днище со ступицей 4, при помощи которой она устанавливается на вал 5 и вращается вместе с ним от механического привода. Сверху корзина имеет кольцевую крышку 6, центральное отверстие которой предназначено для подачи рабочей жидкости.

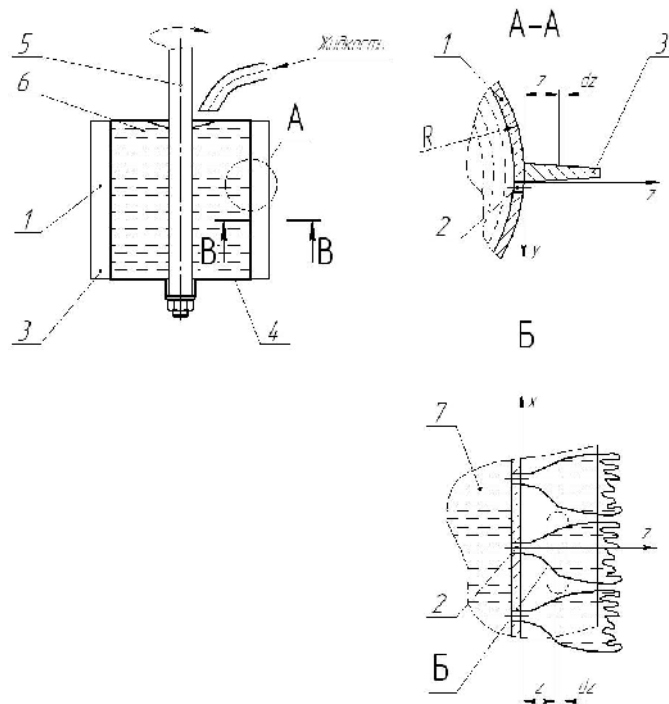


Рисунок 1 – Схема и принцип работы веерного роторно-пленочного устройства

При работе ВРПУ жидкость, истекающая через отверстия 2, попадает на лопасти 3 в виде струй, имеющих приблизительно круглое поперечное сечение. Двигаясь под действием центробежной силы по направлению к кромке веерных лопастей, струи постепенно преобразуются на них в пленку 7 под действием движущей силы смачивания, а также силы Кориолиса, которая в данном случае вносит существенный вклад в процесс растекания.

Процесс растекания жидкости по поверхности твердого тела, т.е. самопроизвольный процесс течения жидкости по твердой поверхности, происходящий за счет уменьшения свободной поверхностной энергии системы, до сих пор представляет научный и практический интерес.

Подобно растеканию каплей жидкости по твердой поверхности, рассматриваемый процесс растекания струй жидкости на лопастях ВРПУ реализуется путем последовательной смены нескольких режимов.

Скорость растекания зависит от соотношения движущей силы и силы сопротивления. Движущая сила процесса растекания при ограниченном смачивании гладкой однородной поверхности, т.е. при постепенном изменении краевых углов от некоторого начального значения до конечного, приближающегося в пределе к равновесному краевому углу θ_0 (например, при растекании капли воды на металле, покрытом окисной пленкой), в соответствии с уравнением Юнга равна [1]:

$$\Delta\sigma = \sigma (\cos\theta_0 - \cos\theta), \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз жидкость-газ;

θ – динамический краевой угол, зависящий от времени τ контакта твердого тела с жидкостью.

В ряде случаев в создание движущей силы растекания значительный вклад вносят и другие факторы, например, уменьшение потенциальной энергии растекающейся по твердой поверхности капли при снижении ее центра тяжести, изменение поверхностного натяжения вследствие химических или физико-химических взаимодействий между веществами, участвующими в смачивании, и т.д.

Сопrotивление процессу растекания надо рассматривать как результирующую сопротивлениа, сосредоточенного непосредственно возле линии смачивания, и сопротивлениа, сосредоточенного в объеме растекающейся жидкости.

Режим растекания в случае преобладания первого сопротивлениа называют кинетическим. Если же растекание контролируется различными гидродинамическими факторами (вязкостью жидкости, силами инерции, ламинарностью или турбулентностью потока и т.д.), то такой режим растекания называют гидродинамическим.

Закономерности процесса растекания в кинетическом и гидродинамическом режимах исследованы преимущественно на примере растекания капель жидкостей на поверхности различных твердых материалов.

На начальной стадии растекания, когда расстояние от места первоначального соприкосновения жидкости с твердой поверхностью до линии смачивания невелико, реализуется кинетический режим. Этот режим весьма непродолжителен и, как показали исследования [1,3,4], длиться в среднем не более 10^{-3} с, иногда $\sim 10^{-2}$ с. Скорость растекания ν при этом режиме растекания постоянна и составляет десятки, а в некоторых случаях сотни см/с. При ограниченном смачивании в кинетическом режиме [1] скорость растекания составляет

$$\nu = A\sigma_{жг} (\cos\theta_0 - \cos\theta_\theta), \quad (2)$$

где A – коэффициент пропорциональности, определяемый по скорости растекания в начальный момент контакта, когда $\theta_\theta = 180^\circ$.

С течением времени динамические краевые углы θ сильно уменьшаются. В конце кинетического режима динамические краевые углы изменяются незначительно и скорость перемещения линии смачивания существенно уменьшается.

После кинетического режима наступает инерционный режим, при котором сопротивлениа растеканию определяется в основном силами инерции, действующими в объеме жидкости. Этот режим представляет первую форму гидродинамического режима растекания. Инерционный режим длиться доли секунды, а затем сменяется вязким режимом, представляющим вторую форму гидродинамического режима растекания. Основная сила сопротивлениа при растекании в вязком режиме – сила вязкого (внутреннего) трения в объеме жидкости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим закономерности растекания элементарного объема преобразуемой в пленку струи жидкости на лопасти ВРПУ с шириной, равной dz (рис. 2). При этом центр системы координат, вращающейся совместно с ВРПУ, расположим в точке истечения жидкости из отверстия перфорированной оболочки корзины.

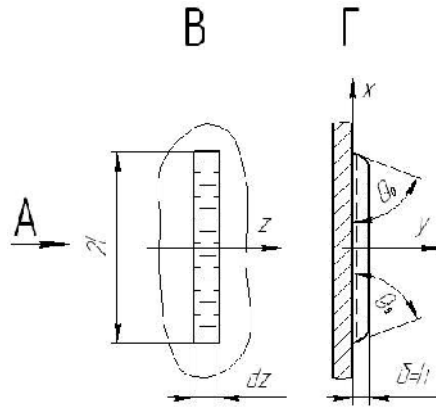


Рисунок 2 – Схема растекания элемента пленки на лопасти ВРПУ

Исследователями замечено, что при растекании маловязких жидкостей закономерности вязкого режима проявляются наиболее отчетливо при растекании капли по твердой поверхности в виде тонкой пленки, когда смоченная площадь значительно превышает начальную поверхность капли [1,5]. Распространим сказанное на растекание вышеуказанного элементарного объема (участка) жидкой пленки на лопасти ВРПУ.

В рассматриваемом случае теоретическое описание вязкого режима растекания может быть основано на анализе общей системы гидродинамических уравнений движения жидкости по горизонтальной твердой поверхности. Предлагается рассматривать растекание указанного выше элементарного объема жидкости шириной dz на лопасти ВРПУ как одномерное растекание по узкой прямолинейной полосе с постоянной шириной dz (рис. 2).

Систему уравнений, описывающих линейное течение вязкой несжимаемой жидкости по прямолинейной полосе в соответствии с [2] можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) &= - \left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \left(\frac{\eta}{\rho} \right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{1}{\rho} \right) \Sigma f_x, \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где u и v - компоненты скорости вдоль и перпендикулярно поверхности твердого тела; p - давление; η и ρ - вязкость и плотность жидкости; f_x - внешняя сила, действующая на единицу объема жидкости в направлении течения (вдоль оси x); τ - время.

Данная система уравнений справедлива при достаточно тонком слое жидкости, т.е. его толщина $\delta \ll l$, где l - расстояние от центра до границы жидкой фазы.

Первое уравнение в системе (3) является следствием закона сохранения энергии, а третье - условием неразрывности потока.

Внешняя сила f_x , действующая на единицу объема слоя жидкости, равна

$$f_x = - \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (4)$$

где $F = F_{не} + F_i$ – свободная энергия системы; $F_{не}$ – свободная поверхностная энергия; F_i – другие компоненты свободной энергии, связанные с влиянием силы тяжести и других внешних факторов; в данном случае влиянием силы тяжести по сравнению с силой Кориолиса можно пренебречь.

Тогда при описании растекания по лопасти ВРПУ

$$F = F_{не} + F_{кор}, \quad (5)$$

где $F_{кор}$ – свободная энергия системы, связанная с влиянием силы Кориолиса.

Систему уравнений (3) можно существенно упростить. Принимая во внимание, что толщина слоя жидкости на поверхности лопасти ВРПУ мала, и пренебрегая локальной производной скорости по времени $\partial u / \partial t$

по сравнению с членом $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$, рассматривая растекание в нашем

случае как квазистационарный процесс, и, наконец, считая, что внешнее давление в системе отсутствует, а поверхность жидкости имеет весьма малую кривизну (поэтому можно пренебречь слагаемым $\partial p / \partial x$), уравнение движения жидкости вдоль оси x будет иметь следующий вид:

$$\left(2\Delta\sigma\frac{\partial z}{m}\right) - \frac{\partial F_{кор}}{\partial x} + \left(\frac{\eta}{\rho}\right)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = 0, \quad (6)$$

где m – масса рассматриваемого элементарного объема жидкости.

Граничные условия: на свободной поверхности жидкости (при $y = \delta$) $\partial u / \partial y = 0$, а на границе жидкость-поверхность лопасти (при $y = 0$) скорость перемещения $u = 0$.

В момент прекращения растекания устанавливается равновесие, при котором работа сил адгезии W_a становится равной работе силы Кориолиса и растекание прекращается.

Работа сил адгезии из уравнения равновесного краевого угла равна [1,6]:

$$W_a = \sigma_{жз} (1 + \cos\theta_0). \quad (7)$$

Аналогичную зависимость получим для $\Delta\sigma$ из уравнения (1), принимая $\theta = 180^\circ$:

$$\Delta\sigma = \sigma_{жз} (1 + \cos\theta_0). \quad (8)$$

Так как толщина жидкой пленки h будет практически одинакова в пределах всей смоченной площади рассматриваемого элемента (рис. 2), то потенциальная энергия силы Кориолиса для 1 кг жидкости будет равна

$$F_{кор} = 1 \cdot S_{к} \cdot h / 2, \quad (9)$$

где S – ускорение Кориолиса, равное

$$S_{к} = 2 \cdot \omega \cdot v_z, \quad (10)$$

где ω – угловая скорость вращения ВРПУ; v_z – относительная скорость потока жидкости на лопасти ВРПУ.

Движущая сила растекания, обусловленная уменьшением энергии Кориолиса:

$$f'_{\partial z} = - \left(\frac{\partial F_{\text{кор}}}{\partial x} \right). \quad (11)$$

Поскольку $h = \frac{V}{2 \cdot l \cdot \partial z}$, то $f'_{\partial z} = - \left(\frac{S_{\text{к}} \cdot V}{4 \cdot l^2 \cdot \partial z} \right)$, здесь V - объем выделенного элемента жидкой пленки.

Выполнив подстановку и преобразования уравнения (6) при условиях равновесия, получим зависимость для минимальной (предельной) толщины жидкой пленки на лопасти ВРПУ:

$$h = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{жг}}(1 + \cos \theta_0)}{\rho \omega v_z}}. \quad (12)$$

Экспериментально, путем измерения траектории полета капель жидкости, срывающихся с кромки лопастей ВРПУ, установлено, что относительная скорость жидкости на лопастях находится в пределах $(0,8-0,88)v_{\text{пер}}$, где $v_{\text{пер}} = \omega(R+z)$.

Справедливость зависимости (12) также подтверждена проведенными экспериментами на специальной исследовательской установке, снабженной сменными калиброванными насадками для жидкости, устанавливаемыми на корзине, сменными лопастями со шкалой, стробоскопом и другими приспособлениями и приборами.

Отклонение экспериментальных данных от теоретической зависимости (12) не превышало $\pm 5\%$.

ВЫВОДЫ

1. Получена теоретическая зависимость для расчета геометрических параметров (толщины и ширины) жидкой пленки на лопастях ВРПУ.

2. Результаты данной работы значительно упрощают расчет и могут быть использованы для создания методик инженерных расчетов распылителей жидкости, а также испарителей, конденсаторов и других теплообменных устройств на основе ВРПУ (в случае обогреваемых и охлаждаемых лопастей).

SUMMARY

THEORETICAL BASIS OF THE MINIMUM (LIMITING) THICKNESS OF THE LIQUID FILM ON THE FAN-ROTOR-FILM DEVICES

*E.I. Baranov, S.I. Jakushko,
Sumy State University, Sumy*

The analysis of application and work principle of the rotary film devices is carried out. The spreading mechanisms of the liquid on a surface of the firm rotating blade are considered. Theoretical dependence for calculation of geometrical parametres (thickness and width) of the fluid film on revolving blade is received.

Key words: *liquids spreading, the rotating blade, a film, drops.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сумм Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. - М.: Химия, 1976. - 232 с.
2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - М.- Л.: Гостехиздат, 1944. - Т.3. - 624 с.
3. Физическая химия поверхностных явлений в расплавах / В.И. Ишимов и др. - К.: Наукова думка, 1971. - С. 213-218.
4. Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел / В.П. Ченезов и др. - К.: Наукова думка, 1972. - С. 298-301.
5. Щукин Е.Д. Поверхностная диффузия и растекание / Е.Д. Щукин, Б.Д. Сумм. - М.: Наука, 1969. - С. 161-187.
6. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон, Е.Д. Щукин, Б.Д. Сумм. - М.: Химия, 1974. - 416 с.

Поступила в редакцию 16 июня 2010 г.