

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА

В. Э. Борзых, Г. Г. Волокитин, С. К. Карандашов, А. М. Шиляев

Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003 Томск

Предпринято экспериментальное исследование поведения слоя жидкости, движущейся в поле массовых сил по внутренней поверхности вращающегося вертикального цилиндра. Построены образующиеся в этих условиях профили свободной поверхности движущейся жидкости. Получена в критериальной форме эмпирическая зависимость для средней толщины пленки. Обнаружено наличие гидравлического скачка в нижней части цилиндра за входом жидкости на вертикальную поверхность.

На явлении движения тонких пленок в поле центробежных сил основаны многие технологические устройства, применяемые для интенсификации тепло- и массообмена в жидкости или ее распыления [1–8]. В частности, при плавлении стеклообразующего материала во вращающемся плазмохимическом реакторе для производства минерального волокна происходит движение расплавленной массы по внутренней поверхности устройства [8]. Свойства материала получающихся волокон формируются непосредственно в пленке, движущейся под действием тепловой и динамической нагрузки. Знание толщины пленки жидкости и характера ее распределения по осевой координате при движении по внутренней поверхности вращающегося цилиндра позволяет рассчитать теплообмен такого пленочного устройства.

В [1] для внутренней вращающейся цилиндрической поверхности построена теория центробежных форсунок, основанная на модели потенциального движения невязкой жидкости. Однако сравнение полученных теоретических зависимостей проведено с экспериментальными результатами исследования пленочного растекания жидкости по горизонтальной поверхности под действием только силы тяжести. Для вязких течений на внутренней вращающейся цилиндрической поверхности экспериментальных работ мало и они слабо согласуются с теоретическими исследованиями. В [3] проведен расчет теплопередачи при конденсации пара на пленку жидкости, стекающей по горизонтальной пластине. Показано, что даже когда массовая сила нормальна к поверхности конденсации, теплоотдача может иметь конечное значение, если на кромках допустить стекание. Тогда толщина пленки конденсата и результирующая теплоотдача регулируются изменением гидростатического давления по толщине пленки. Полученные результаты можно применить к конденсации внутри вращающегося цилиндра при условии малой кривизны поверхности и значительной частоте вращения. Однако для замыкания решения, описывающего эту модель, необходимо привлечение двух эмпирических параметров: начальной и конечной толщины пленки конденсата. Решение для толщины ламинарной пленки, движущейся по внутренней поверхности вращающегося цилиндра, для которого требуется одно экспериментальное значение — начальная толщина пленки — получено в [4]. Оба решения [3, 4] имеют одну и ту же особенность: резкое уменьшение до нуля толщины движущейся жидкой пленки, характерное для центральной по продольной координате области течения.

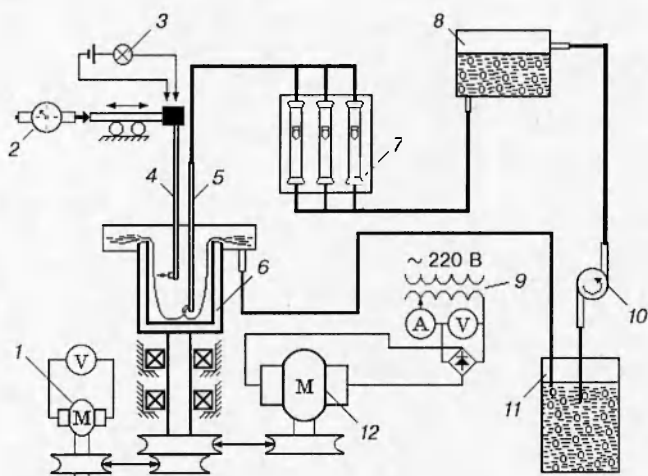


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — тахогенератор, 2 — индикатор, 3 — светодиод, 4 — штанга, 5 — патрубок, 6 — цилиндр, 7 — ротаметры, 8 — бак, 9 — автотрансформатор, 10 — насос, 11 — резервуар, 12 — двигатель постоянного тока

В ранних экспериментальных работах в этой области [5, 6] изучалось движение жидкости во вращающейся трубе, отбортованной с торцевых частей широкими кольцами. Получены зависимости производительности устройства от расхода и угловой частоты вращения. Визуализация течения с помощью подачи трассеров в виде подкрашенной жидкости показала его двухслойный характер. Основной поток массы происходил в тонком слое, расположенном ближе к центру от среза отбортовки. В [7] экспериментально исследовалось влияние вязкости на движение жидкости во вращающемся цилиндре при различных способах ее ввода. Результаты выглядят несколько неожиданными: толщина движущегося слоя уменьшается с ростом вязкости. Этот эффект был объяснен «проскальзыванием» подвижного слоя жидкости в условиях двухслойного течения. В настоящей работе представлена иная, основанная на экспериментальных данных, интерпретация этого эффекта.

Для исследования пленочных течений жидкости с постоянной вязкостью по внутренней поверхности вращающегося цилиндра создан экспериментальный стенд (рис. 1), рабочим элементом которого является полый вращающийся цилиндр 6. На стенде предусмотрено специальное посадочное место для установки сменных цилиндров, которое жестко крепится на центрирующем конусе вала. Все ответственные детали, включая рабочие цилиндры, изготавливались по 8-му классу точности, ответные детали подгонялись притиркой с соблюдением соосности до 0,01 мм. При установке цилиндров в рабочее положение дополнительно производился контроль соосности с помощью жестко укрепленного на станине индикатора часового типа и необходимая балансировка регулировочными винтами. Использовались три цилиндра высотой 0,19; 0,23; 0,25 м и радиусом соответственно 0,04; 0,0515; 0,0375 м.

В качестве модельной жидкости использовалась дистиллированная вода комнатной температуры. Выбор этого вещества обусловлен его доступностью и хорошей изученностью физических свойств. Температура жидкости постоянно контролировалась лабораторным термометром с точностью 0,1 °С. Изменение температуры в ходе опыта учитывалось с помощью специальных поправок в виде полиномиальной зависимости вязкости воды от измеренной температуры в опыте, используемых при обработке экспериментальных данных. Частота вращения цилиндра плавно регулировалась изменением числа оборотов двигателя постоянного тока 12 с помощью автотрансформатора 9. Контроль и стабилизация частоты вращения цилиндра производились с помощью электромеханического тахогенератора 1, управляющего стабилизирующим устройством, включенным в цепь питания электродвигателя постоянного тока. В связи с тем, что тахогенераторы имеют достаточ-

но большую отнесенную к верхнему пределу измерений погрешность, достигающую 4 %, в системе контроля частоты вращения предусмотрен коммутатор каналов, обеспечивающий разбиение всей области изменения выходного сигнала на приблизительно равные промежутки. Каждый интервал подвергался отдельной градуировке, что позволило снизить относительную методическую погрешность измерения скорости вращения цилиндра до 1,5 %.

На дно вращающейся емкости по патрубку 5 через блок ротаметров 7 из бака 8 подавалась модельная жидкость, которая тонким слоем двигалась по внутренней полости и распылялась с верхнего торца в приемное устройство. На стенде была организована обратная система подвода жидкости насосом 10 из резервуара 11. Расход жидкости измерялся с помощью ротаметров типа РС IV, относительная погрешность которых составляет 4 %. Для уменьшения ошибки измерений в стандартные ротаметры вставлены дополнительные поплавки, изготовленные из материалов с различной плотностью. Показания каждого поплавка градуировались отдельно, что снизило общую относительную погрешность до 1,5 %.

Измерение локальной по осевой координате толщины пленки осуществлялось методом касания, который был несколько модернизирован. Место положения свободной поверхности потока регистрировалось по замыканию контакта между серебряным диском и тонкой упругой проволокой, отклоняемой вращающимся слоем жидкости. Длина и упругость проволоки подбирались опытным путем на прозрачном цилиндре, критерием момента касания служило появление первых волн возмущения вокруг конца стержня. Таким образом были установлены оптимальные характеристики датчика: длина 10–12 мм, диаметр проволоки 0,07 мм.

Датчик крепился на жесткой штанге 4, соединенной с координатным устройством вертикального типа, позволяющим позиционирование устройства по осевой координате с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,2$  мм. Перемещение датчика осуществлялось при помощи микровинта. Момент касания фиксировался визуально (светодиод 3), радиальная координата регистрировалась по показаниям индикатора часового типа 2 с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,01$  мм. Толщина слоя жидкости определялась как разница координат касания поверхности пленки и стенки.

С целью учета возможных вибраций цилиндра при вращении предварительно проводились измерения положения «сухой» стенки при различных скоростях вращения. Полученные данные в виде аппроксимационных зависимостей использовались в качестве поправок при обработке результатов экспериментов.

Согласно анализу изотермической задачи [3, 4], в данном процессе толщина пленки — это функция нескольких переменных:

$$\delta = f(r_0, H, G_m, \mu, g, \omega, \rho),$$

где  $r_0$ ,  $H$  — внутренний радиус и высота цилиндра;  $G_m$  — массовый расход жидкости;  $\mu$ ,  $\rho$  — динамическая вязкость и плотность жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\omega$  — частота вращения устройства.

Следуя теории размерностей, составим безразмерные комплексы:

$$\delta/r_0, \quad H/r_0, \quad Re = 4G/\nu, \quad Re_\omega = \omega r_0^2/\nu, \quad B = \omega^2 r_0/g. \quad (1)$$

Здесь  $\delta/r_0$  — безразмерная толщина пленки;  $H/r_0$  — относительная высота цилиндра;  $Re$  — пленочное число Рейнольдса, построенное по гидравлическому диаметру сечения пленки;  $Re_\omega$  — вращательное число Рейнольдса;  $B$  — перегрузочное число;  $\Gamma = G_m/(2\pi r_0 \rho)$  — плотность орошения.

С целью адекватного физического моделирования и планирования экспериментальных исследований необходимо соблюдение равенства пределов изменения числовых значений безразмерных комплексов (1), характерных для реального технологического процесса,

пределам изменения этих параметров, используемых при определении границ области экспериментального пространства.

Определим область изменения размерных технологических параметров для расплавов стекломассы. По данным [9], производительность промышленных распылительных устройств, применяемых на минераловатных производствах, составляет 2000–3000 кг/ч. Плотность стекломассы в зависимости от химического состава варьируется от 1500 до 2500 кг/м<sup>3</sup>. Радиус распылительного устройства равен радиусу емкости-гомогенизатора и определяется из условия возможности размещения в его внутренней полости плазмогенерирующего устройства необходимой мощности. По предварительным данным, полученным для экспериментальной установки [8], радиус полости составляет 0,1–0,15 м. При производстве минеральной ваты длина и толщина получаемых нитей во многом определяется вязкостью расплавов и частотой вращения распылителя. В зависимости от типа волокна (от ультратонкого до армировочного) вязкость обеспечивается в пределах 0,01–0,7 Па·с, частота вращения [10] устанавливается равной 150–500 с<sup>-1</sup>.

Исходя из вышеизложенного, для безразмерных комплексов (1) следует записать

$$2 < Re < 800, \quad 10^4 < Re_\omega < 10^7, \quad 200 < B < 3000. \quad (2)$$

В ходе опытов для каждого цилиндра на определенном срезе по его высоте проводился двухфакторный эксперимент типа латинского квадрата. Варьируемыми факторами являлись расход жидкости и угловая частота вращения цилиндра, из которых по геометрическим и физическим характеристикам процесса строились безразмерные комплексы (1). В каждом узле экспериментального плана проводилось от 3 до 5 измерений в зависимости от воспроизводимости результатов.

Во всех экспериментах размерные параметры изменялись в пределах:

$$0,72 < G_m < 56,63 \text{ г/с}, \quad 74 < \omega < 460 \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

В соответствии с (3) безразмерные параметры (2) изменялись в пределах:

$$12 < Re < 700, \quad 112\,000 < Re_\omega < 640\,000, \quad 22 < B < 865. \quad (4)$$

Исходя из значений (4) и согласно [11], можно предположить полную автомодельность процесса по вращательному числу Рейнольдса  $Re_\omega$ . Зависимость для безразмерной толщины пленки на каждом срезе высоты цилиндра следует искать в виде двухпараметрической функции

$$\delta/r_0 = c Re^m B^n, \quad (5)$$

где  $c$ ,  $m$ ,  $n$  — аппроксимационные коэффициенты.

С помощью метода Брандона [12] для каждой осевой координаты исследуемого цилиндра строились аппроксимационные зависимости вида (5), по которым восстанавливались профили свободной поверхности движущегося слоя жидкости для фиксированно выбранных значений чисел  $Re$  и  $B$  для каждого используемого цилиндра.

Полученные профили использовались для вычисления среднеинтегральной толщины пленки  $\langle \delta \rangle$  по высоте цилиндров. Аппроксимация полученных величин с общим коэффициентом корреляции 0,96 и ошибкой прогнозирования не более 10% дает зависимость

$$\langle \delta \rangle / r_0 = 0,05 (H/r_0)^2 Re^{1/4} B^{-1}. \quad (6)$$

Характер аппроксимации экспериментальных данных зависимостью (6) представлен на рис. 2.

Все восстановленные профили свободной поверхности жидкости (рис. 3) имеют явно выраженный максимум в нижней части цилиндра. Эксперимент проводился при  $Re = 100$ ,

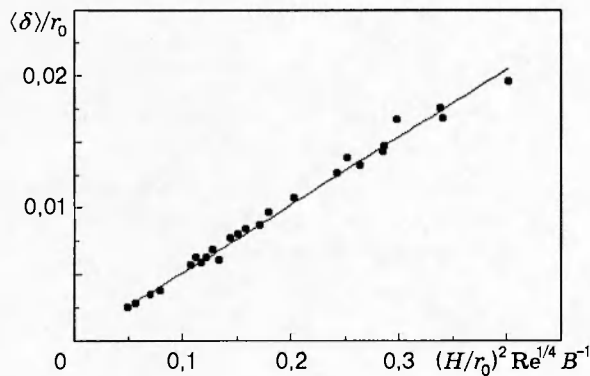


Рис. 2

Рис. 2. Линеаризованная зависимость средней по длине цилиндра толщины пленки жидкости (точки — эксперимент)

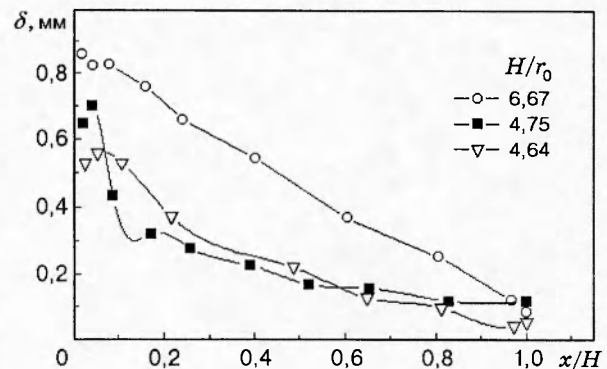


Рис. 3

Рис. 3. Характерные профили свободной поверхности жидкости, движущейся по внутренней поверхности вращающегося цилиндра

$B = 500$ . Природа максимума связана с преодолением сил трения и сил тяжести на вертикальной стенке при повороте потока у дна устройства и начальным распределением скорости в пленке. С увеличением радиуса цилиндра и расхода жидкости высота утолщения возрастает, а его протяженность уменьшается. Это объясняется тем, что жидкость, подаваемая в центральную часть диска, образующего дно цилиндра, успевает более сильно разогнаться к месту поворота потока. Происходит «отдача» от вертикальной поверхности, и с увеличением длины участка разгона при формировании профиля на входном участке радиальная составляющая скорости, направленная к центру цилиндра, имеет более высокое значение.

В области максимума толщины слоя происходит гидравлический скачок, подобный возникающему при движении жидкости по горизонтальной поверхности в условиях растекания набегающей струи [13]. За передним фронтом утолщения существует тороидальный вихрь, наличие которого в области гидравлического скачка на горизонтальной пластине зафиксировано в эксперименте [14]. Косвенным подтверждением существования возвратного течения в нижней части движущейся по внутренней поверхности вращающегося цилиндра пленки жидкости может служить наличие утолщения жидкого слоя при его безрасходном вращательном движении. Утолщение в профиле свободной поверхности сохраняется достаточно продолжительное время после прекращения подачи модельной жидкости, что объясняется постепенным затуханием вихря вследствие диссипации энергии в процессе вязкого трения [15]. Однако это время несколько больше характерного времени релаксации вихря  $\tau$  для присутствующих измеренных в эксперименте масштабов утолщений, оцениваемого как  $\tau = L/(\Omega\nu)^{1/2}$ , где  $L$  — характерный размер (в нашем случае половина глубины в области скачка);  $\Omega$  — начальная скорость вращения вихря, пропорциональная среднерасходной скорости движения жидкости;  $\nu$  — вязкость жидкости. Это обстоятельство можно объяснить отставанием внутренних слоев жидкости, для которых период выхода на «твердотельное» вращение более длительный.

За максимумом пленка имеет волнистый характер, что объясняется постепенной релаксацией возмущений и стремлением течения выйти на режим, характеризующийся ли-



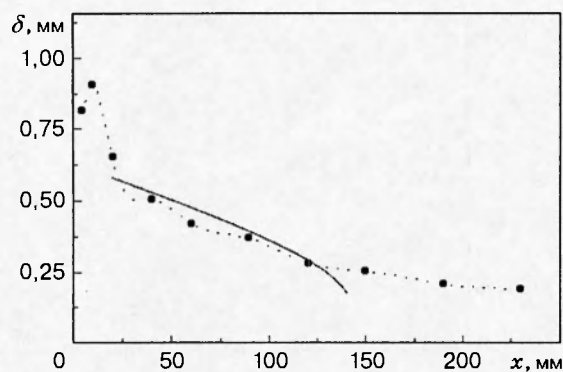


Рис. 4. Профиль свободной поверхности пленки жидкости: точки — эксперимент, сплошная линия — аналитическое решение для ламинарного течения [4]

нейным профилем свободной поверхности в условиях гидростатического равновесия. Для коротких и широких цилиндров (две нижние кривые на рис. 3) за узкой областью гидравлического скачка наблюдается резкое падение глубины слоя, после чего дальнейшее изменение толщины пленки незначительно. Силы вязкого трения стремятся подавить возмущения, вносимые в поток инерционностью и геометрией течения, в связи с чем, очевидно, при увеличении вязкости жидкости будет уменьшаться высота скачка и, следовательно, средняя толщина пленки. Этим можно объяснить полученный результат для средней толщины движущейся пленки, определяемый зависимостью (6), где вязкость входит в знаменатель.

Сравнение экспериментальных профилей ( $Re = 206$ ,  $B = 433$ ,  $H/r_0 = 4,64$ ) с аналитическим решением для ламинарной пленки, полученным в [4], дает удовлетворительное согласие в центральной (по осевой координате) части потока. Видно, что область, где расчетная кривая близка к экспериментальным точкам, охватывает лишь часть цилиндра (рис. 4). Анализ показывает, что вниз по течению меняется закон трения, и ламинарное приближение, в основу которого положен параболический профиль распределения в пленке осевой скорости по радиальной координате, не может быть реализовано. На формирование профиля поверхности пленки оказывают влияние как характеристики входного участка, так и условия слива.

#### Выводы

1. Проведена серия экспериментов и построены профили свободной поверхности слоя жидкости, движущегося в поле массовых сил по внутренней поверхности вращающегося вертикального цилиндра.

2. Получена эмпирическая зависимость для средней толщины пленки, охватывающая начальный участок движения жидкости в условиях свободного перелива через острую кромку вращающегося цилиндра.

3. В нижней части цилиндра обнаружен существенно влияющий на структуру потока гидравлический скачок, осевое положение которого слабо зависит от изменения расхода жидкости и угловой частоты вращения устройства.

Работа выполнена при поддержке гранта по исследованиям в области фундаментальных проблем охраны окружающей среды и экологии человека (код проекта 6-90).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштик М. А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981.
2. Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В., Ягоднин В. И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977.

3. Липперт Т. Е., Ниммо Б. Г. Ламинарная пленочная конденсация на поверхностях, нормальных массовым или инерционным силам // Теплопередача. 1968. Т. 90, № 1. С. 149–153.
4. Постников С. Н. Пленочное течение на внутренней поверхности вращающегося цилиндра // Сопряженные задачи механики и экологии: Материалы Междунар. конф. Томск, сент.–окт. 1996. Томск: ТГУ, 1996. С. 154.
5. Bass E. Strömungen im fliehkraftfeld. I // Periodica polytechnica. Eng. Maschinen und Burwesen. 1959. S. 321–340.
6. Bass E. Strömungen im fliehkraftfeld. II // Periodica polytechnica. Eng. Maschinen und Burwesen. 1960. S. 41–61.
7. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / Под ред. В. М. Олевского. М.: Химия, 1988.
8. Волокитин Г. Г., Борзых В. Э., Унжаков С. О., Шиляев А. М. Плазменные технологии получения минерального волокна из золотходов промышленности // Сиб. физ.-техн. журн. 1993. Вып. 1. С. 74–78.
9. Горяйнов К. Э., Горяйнова Г. К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М.: Стройиздат, 1982.
10. Кулаго А. Е. Гидродинамические и тепловые процессы в механизме волокнообразования: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 1984.
11. Баренблатт Г. И. Подobie, автомодельность, промежуточные асимптотики. М.: Гидрометеиздат, 1982.
12. Саутин С. Н., Пунин А. Е. Мир компьютеров и химическая технология. Л.: Химия, 1991.
13. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Троян Е. Н., Алексеенко С. В. Течение тонких пленок жидкости // Волновые процессы в двухфазных системах. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1975. С. 129–206.
14. Craik A. D. D., Latham R. G., Fawkes M. J., Gribbon P. W. F. The circular hydraulic jump // J. Fluid Mech. 1981. V. 112. P. 347–362.
15. Гринспен Х. П. Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеиздат, 1975.

*Поступила в редакцию 20/1 1997 г.*

---