

УДК 532.591

**Модифицированный абсорбционный
оптический метод диагностики
волновой пленки жидкости
на вращающейся поверхности***

**И.К. Кабардин, В.В. Рахманов, В.Г. Меледин, И.А. Елисеев,
С.В. Двойнишников**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: kabardin@itp.nsc.ru

Предложена модификация абсорбционного оптического метода для диагностики волновой пленки жидкости на поверхности вращающегося диска. Проведены аналитические и экспериментальные оценки погрешности метода. Выполнены полевые измерения толщины пленки жидкости на вращающемся диске.

Ключевые слова: абсорбционный оптический метод, поле толщины, волновое течение пленки, вращающийся диск.

Волновые пленочные течения используются во многих технологических процессах. Малое тепловое сопротивление и большая поверхность контакта при низких удельных расходах жидкости делают пленку жидкости весьма эффективным средством в процессах межфазного тепломассообмена [1–3]. Частным случаем пленочного течения является растекание жидкости на вращающейся поверхности диска. Дополнительным параметром для таких течений служит скорость вращения. Изменение скорости вращения позволяет варьировать толщину пленки жидкости и при высоких скоростях вращения делать пленку очень тонкой. Волновые пленочные течения важны для таких промышленных приложений как дистилляция, ректификационные и обменные колонны в химической промышленности, дезинтеграция жидких металлов в порошковой металлургии и многих других. Течению жидкости на вращающейся поверхности, как и другим волновым пленочным течениям, свойственны образование крупноамплитудных волн и сложная волновая динамика на поверхности раздела жидкости и газа. Для изучения волновых процессов необходимо диагностировать мгновенное распределение толщины волновой пленки.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Мин. науки и обр. РФ (ГК № 14.740.11.0547, ГК № 14.740.11.0144, МК-3229.2011.8) и РФФИ (проект № 07-01-00-223-а).

Цель данной работы заключалась в модификации абсорбционного оптического метода для полевой диагностики волнового пленочного течения на вращающейся поверхности диска с погрешностью, не превышающей 10 %.

Экспериментальное изучение волновой структуры пленочного течения на вращающейся поверхности выполнялось в небольшом количестве работ. Авторы работ [4, 5] провели первые систематические измерения с применением метода касания для измерения максимальной величины гребней. В работе [6] локальное измерение толщины пленки производилось абсорбционным оптическим методом. В работах [7–10] измерялась толщина пленки с помощью метода проводимости. Авторы [11] применили емкостной метод для измерения толщины пленки. Толщина пленки измерялась по величине сопротивления протекающему между электродами току. В работе [12] оценивали толщину пленки через массовый расход M : $h = (3\mu M / 2\pi r^2 \omega^2 \rho^2)^{1/3}$, здесь μ — динамическая вязкость жидкости, ρ — плотность жидкости. В [13] определялась толщина пленки методом рассеяния света.

Указанные методы измерения толщины пленки имеют свои особенности и ограничения. Метод касания — контактный, поэтому возмущает поток и не подходит для тонких исследований пленок. Абсорбционный оптический метод, использованный в [6], лишен многих недостатков, но был реализован локально. Емкостной метод отличается нестабильностью параметров к изменению внешней среды и нуждается в постоянной калибровке. Метод оценок, выведенных по расходу жидкости, удовлетворительно описывает симметричное невозмущенное пленочное течение и неприменим к сложным нестационарным процессам.

Известен абсорбционный оптический метод [14], в основе которого лежит ослабление интенсивности света, проходящего через поглощающую среду. Связь между интенсивностью падающего и прошедшего света определяется по формуле:

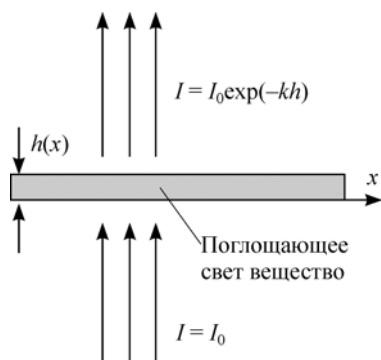
$$I = I_0 \exp(-kh). \quad (1)$$

Метод позволяет измерять поле толщины волновой пленки жидкости. После прохождения света через вещество (рис. 1) интенсивность в каждой точке будет зависеть от толщины поглощающего слоя. По интенсивности прошедшего света вычисляется толщина пленки по формуле

$$h = \ln(I_0 / I) / k. \quad (2)$$

Коэффициент поглощения k определяется процедурой калибровки. Быстродействие метода ограничено характеристиками регистрирующей камеры. Калибровка метода реализуется достаточно просто, метод не возмущает поток.

В работе предложена модификация абсорбционного оптического метода для



исследования волновой пленки жидкости на вращающейся поверхности, схема представлена на рис. 2. Подкрашенная жидкость поступает из бака через сопло на центр вращающегося диска, формируя трехмерное волновое течение. Красителем является раствор перманганата калия. Пленка освещается источником света через матовое стекло. Изображение регистрируется камерой и программно обрабатывается на компьютере.

Рис. 1. Абсорбционный оптический метод.

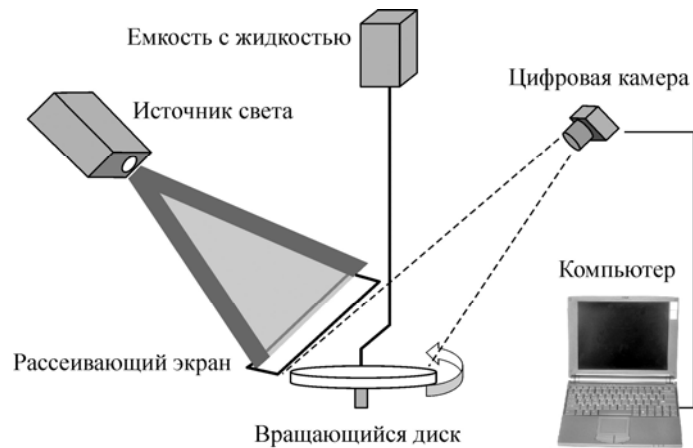


Рис. 2. Схема реализации абсорбционного оптического метода для исследования полной геометрии волновой пленки на поверхности вращающегося диска.

В предыдущих работах при реализации абсорбционного оптического метода анализировалось светопропускание: источник и приемник света располагались по разные стороны прозрачного вращающегося диска. Во многих экспериментах по тепло- и массопереносу вращающиеся поверхности изготавливаются из металла, что требует использования иных схем, основанных на отражении света.

Оптическая схема содержала источник света (компьютерный проектор) и приемник света (цифровая камера) (рис. 2). Свет от источника проходил через матовое стекло, которое формировало равномерную засветку с управляемой поляризацией. Цифровая камера позволяла проводить измерения интенсивности света одновременно во многих точках с хорошим пространственным разрешением.

Коэффициент световой абсорбции k — есть интегральное средневзвешенное значение коэффициентов поглощения жидкости на всех длинах волн в спектральном диапазоне приемника и источника. В работе спектральные характеристики источника света, красителя и спектральная чувствительность приемника считались постоянными. Использование подобного приближения было проверено экспериментально. Показано, что источник, приемник и краситель достаточно стабильны и сохраняют свои спектральные характеристики во времени.

Схема калибровки показана на рис. 3. Слой поглощающей жидкости известной толщины помещался между зеркальной поверхностью и плоской пластиной. Матовый экран освещался источником света с равномерной пространственной интенсивностью. Свет от экрана дважды проходил через стеклянную пластину и

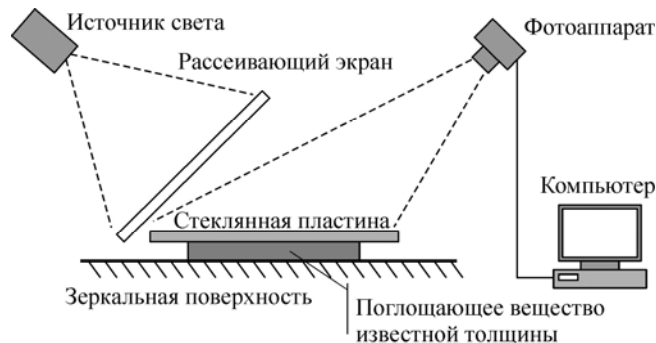


Рис. 3. Калибровка абсорбционного оптического метода.

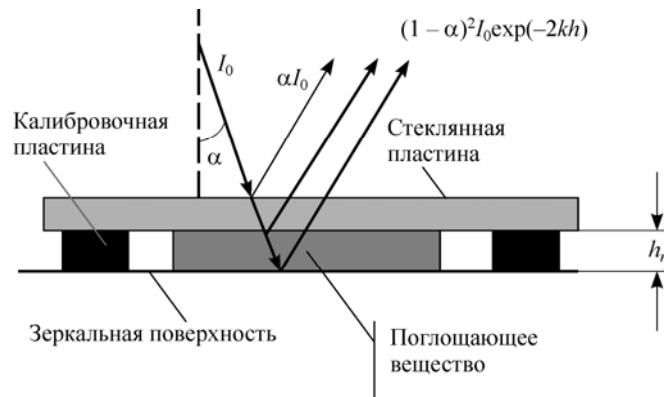


Рис. 4. Ход лучей при калибровке абсорбционного оптического метода.

поглощающую жидкость с отражением от зеркальной поверхности. Изображение регистрировалось приемником света и вводилось для обработки в компьютер.

Ход лучей при калибровке в приближении геометрической оптики показан на рис. 4. Источник и приемник света располагались на большой высоте близко друг к другу. Источник обеспечивал плоский фронт света. Лучи от источника света направлялись по нормали к поверхности пленки жидкости. Для определения паразитной засветки проводились измерения в чистой жидкости. Для калибровки на поверхность диска наносился слой красителя заданной толщины. Доля света, прошедшего через первую границу раздела, равнялась $(1-a) I_0$, здесь $a = 0,04$ — френелевская доля интенсивности отраженного света. У красителя показатель преломления равен 1,33, а у стекла — 1,35. Поэтому потерями на границе раздела стекло–краситель можно пренебречь. После прохождения через краситель интенсивность света составляла $(1-a) I_0 \exp(-2kh)$, после отражения на границе раздела стекло–воздух — $(1-a)^2 I_0 \exp(-2kh)$. Коэффициент k есть среднее от коэффициентов, вычисленных для разных толщин поглощающего слоя:

$$k = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{2h_n} \ln \frac{(1-a)^2 I_0}{I_{h_n} - aI_0}. \quad (3)$$

По результатам калибровки (рис. 5) коэффициент ослабления $k = 0,86 \text{ мм}^{-1}$. Стандартное отклонение коэффициента поглощения составило $\Delta k = 0,046 \text{ мм}^{-1}$.

Для аналитической оценки погрешности измерения толщины пленки абсорбционным оптическим методом имеем: погрешность измерения толщины Δh , погрешность измерения коэффициента поглощения Δk , погрешность измерения интенсивности света ΔI . Подставляя величины $h + \Delta h, k + \Delta k, I + \Delta I$ в формулу (2), получим

$$\delta h \approx \delta(\ln(I_0/I))/k = -(\delta k/k^2) \ln(I_0/I) - (\delta I/I)/k.$$

Из (2) следует:

$$\frac{\Delta h}{h} = \left| \frac{\delta k}{k} \right| + \left| \frac{\delta I}{I} \frac{1}{\ln(I_0/I)} \right|. \quad (4)$$

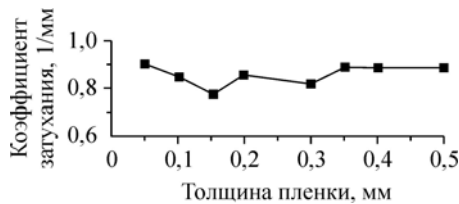
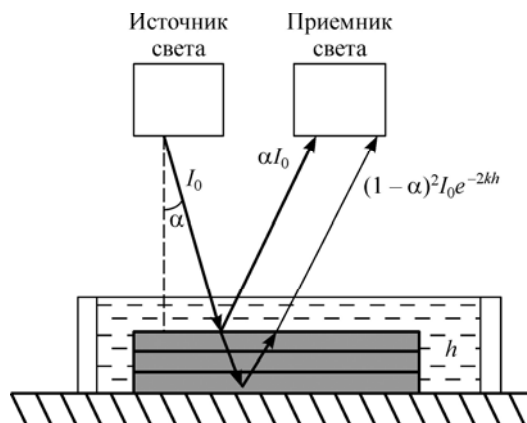


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления от толщины пленки.

Рис. 6. Схема проведения экспериментальной оценки погрешности метода.



В измерениях в качестве приемника света использовалась камера, в которой показания интенсивности одного пикселя изображения кодировались 24-битным числом. Шумы матрицы камеры вносили погрешность измерения интенсивности порядка 1,5 %. Максимальное по модулю значение множителя $\ln(I/I_0)$ может достигать $|\ln(1/256)| \approx 5,45$. Подставляя числа в выражение (4), получаем, что относительная погрешность достигала не более 10 %.

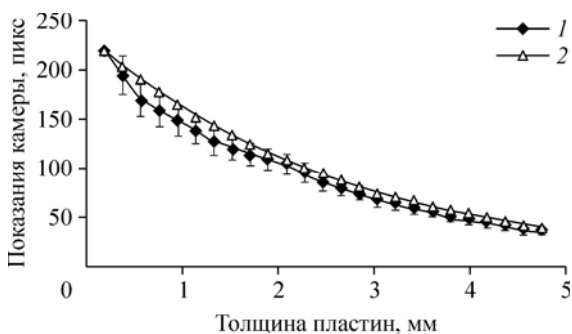
Экспериментальная оценка погрешности метода проведена по измерению толщины набора оптически прозрачных лавсановых пластин толщиной 0,2 мм с фиксированным поглощением света. Схема эксперимента представлена на рис. 6. Для исключения влияния границ раздела воздуха и лавсановых пластин над зеркалом был сооружен резервуар с иммерсионной жидкостью, в который помещались пластины. Показатель преломления иммерсионной жидкости был равен показателю преломления лавсана. Источник формировал коллимированный пучок света, который направлялся по нормали к поверхности пластин. Измерялась паразитная засветка в отсутствие пластин. Доля прошедшего света через границу раздела вода-воздух равнялась $I_2 = (1-a)I_0$. После прохождения через пластины интенсивность света составляла $I_3 = (1-a)I_0 \exp(-2kh)$. На выходе из кюветы интенсивность света равнялась:

$$I_{\text{final}} = (1-a)^2 I_0 \exp(-2kh). \quad (5)$$

Измерения проводились в диапазоне толщин 0,2–5 мм. Результаты измерений представлены на рис. 7.

Интенсивность источника света составляла 250 условных единиц. Коэффициент ослабления света для пластин составлял $k = 0,1853$. Для расчета интенсивности использовалось соотношение $I = 235 \cdot \exp(-2 \cdot 0,1853 \cdot h)$. Из графика видно, что результаты расчета и измерений отличаются менее чем на 10 %.

Исследования модифицированным абсорбционным оптическим методом выполнялись для определения толщины волновой пленки на поверхности



вращающегося диска (рис. 2). В экспериментах жидкость из бака постоянного напора вытекала через сопло на центр диска. Диск вращался с заданной угловой скоростью. Расте-

Рис. 7. Сравнение данных измерений (1) и рассчитанных (2) по формуле (5).

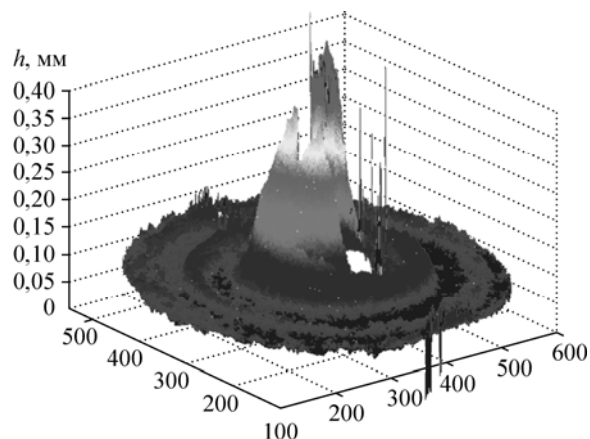


Рис. 8. Поле толщины волновой пленки жидкости на диске диаметром 300 мм ($Q = 3$ мл/с, $\omega = 1,2$ об/с, $H = 2$ мм).

каясь по диску, жидкость формировала волновое пленочное течение. Использовались два диска с диаметрами 300 мм и 76 мм. В экспериментах со стеклянным диском диаметром 300 мм расход задавался в интервале $Q_1 = 0,25 \div 4$ мл/с. В качестве жидкости использовалась подкрашенная дистиллированная вода. Скорость вращения ω_1 задавалась в интервале $0,5 \div 1,2$ об/с.

Диск устанавливался горизонтально с помощью специального юстировочного устройства. В экспериментах с дюралевым диском диаметром 76 мм расход Q_2 задавался в интервале $0,25 \div 25$ мл/с. Скорость вращения задавалась в интервале $\omega_2 = 0,5 \div 30$ об/мин. Сопло диаметром $D = 0,5 \div 2$ мм закреплялось над центром каждого диска на высоте H ($0,5 \div 4$ мм). Температура в баке постоянного напора, дренажной системе и на сопле контролировалась цифровыми датчиками температуры DS18B20. Показания термометров были в диапазоне $20 \div 23$ °С и различались не более чем на $0,2$ °С.

На рис. 8 представлено поле толщины волновой пленки на поверхности диска диаметром 300 мм. Частота вращения — 1,2 об/с, расход — 3 мл/с, $H = 2$ мм. Пленка имеет толщину от 0,1 мм на периферии диска до 0,5 мм у центра. На рис. 9 показано восстановленное поле толщины пленки на диске диаметром 76 мм при $\omega = 5$ об/с, $Q = 5$ мл/с, $H = 2$ мм. Полученные абсорбционным оптическим методом поля толщины позволяют визуализировать течение и восстановить его детальную

структуру: амплитуду, длину, крутизну и скорость волн. Указанные возможности делают метод удобным для диагностики волновой пленки жидкости на вращающейся поверхности.

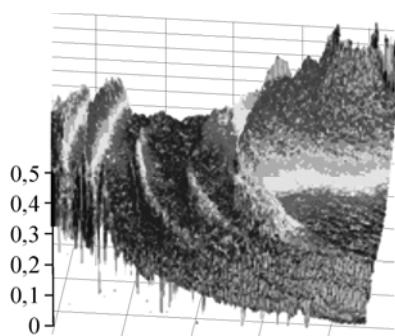


Рис. 9. Поле толщины волновой пленки жидкости на диске диаметром 76 мм ($Q = 5$ мл/с, $\omega = 5$ об/с, $H = 2$ мм).

Заключение

Разработан модифицированный абсорбционный оптический метод для диагностики волновой пленки жидкости на вращающейся поверхности. Метод является бесконтактным и быстродействующим, обладает малой погрешностью, прост в реализации. Выполнены аналитические и экспериментальные оценки погрешности метода. Проведена прямая проверка работоспособности метода на наборе пластин известной толщины. Показано, что погрешность модифицированного абсорбционного оптического метода измерения не превышает 10 %. Показано, что абсорбционный оптический метод позволяет выполнять полевые измерения толщины волновой пленки на поверхности вращающегося диска.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
2. Kutateladze S.S. Semi-empirical theory of film condensation of pure vapours // Int. J. Heat Mass Transfer. 1982. Vol. 25, No 5. P. 653–660.
3. Frisk D.P., Davis E.J. The enhancement of heat transfer by waves in stratified gas-liquid flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 1972. Vol. 15, No 8. P. 1537–1552.
4. Espig H., Hoyle R. Waves in a thin liquid layer on a rotating disk // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 22, Pt. 4. P. 671–677.
5. Lechev I., Peev G. Film flow on a horizontal rotating disk // Chem. Eng. Process. 2003. Vol. 42, No 14. P. 925–929.
6. Charwat A.F., Kelly R.E., Gazley C. The flow and stability of thin liquid films on a rotating disk // J. Fluid Mech. 1972. Vol. 53, Pt. 2. P. 227–255.
7. Matsumoto S.K., Saito K., Takashima Y. The thickness of a viscous liquid film on a rotating disk // J. Chem. Eng. Japan. 1973. Vol. 6, No 2. P. 503–506.
8. Miyasaka Y. On the flow of a viscous free boundary jet on a rotating disk (1st Report: Theoretical analysis) // Bull. JSME. 1974. Vol. 17, No 130. P. 1461–1468.
9. Rifert V.G., Barabash P.A., Muzhilko A.A. Stochastic analysis of wave surface structure of a liquid film under centrifugal forces // Power Engng. 1982. Vol. 8, No 1. P. 56–62.
10. Burns J.R., Ramshaw R.J., Jachuck J. Measurements of liquid film thickness and the determination of spin-up radius on a rotating disk using an electrical resistance technique // Chem. Eng. Sci. 2003. Vol. 58, No 12. P. 2245–2633.
11. Thomas S., Faghri A., Hankkey W. Experimental analysis and flow visualization of a thin liquid film on a stationary and rotating disk // J. Fluid Eng. 1991. Vol. 113, No 1. P. 73–80.
12. Aoune A., Ramshaw C. Process intensification: heat and mass transfer characteristics of liquid film on rotating discs // Int. J. Heat Mass Transfer. 1999. Vol. 42, No 14. P. 2543–2556.
13. Ozar B., Cetegen B.M., Faghri A. Experiments on the flow of a thin liquid film over a horizontal stationary and rotating disk surface // Experiments in Fluids. 2003. Vol. 34, No 5. P. 556–565.
14. Кабардин И.К., Меледин В.Г., Елисеев И.А. Исследование волновых режимов течения пленки на поверхности вращающегося диска // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Тез. докл. III Межд. конф., М.: МЭИ, 2008. С. 35.

Статья поступила в редакцию 6 мая 2011 г.