

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nusselt W. Die Oberflächencondensation des Wasserdampfes. VDI-Zeitschrift, 1916, Bd 60, H. 27.
2. Brauer H. Strommung und Wärmeübergang bei Rieselfilmen. VDI-Forschungs, 1956, Bd 22, Nr 457.
3. Ганчев Б. Г., Козлов В. М., Лозовецкий В. В. Исследование нисходящего течения пленки жидкости по вертикальной поверхности и теплопереноса к ней. Инж.-физ. ж., 1971, т. 20, № 4.
4. Ганчев Б. Г., Козлов В. М. Исследование гравитационного течения пленки жидкости по стенкам вертикального канала большой длины. ПМТФ, 1973, № 1.

УДК 532.57

## СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ЗАМЕРА ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

Б. Я. Карастелев, В. В. Пермяков, А. М. Подсушный,  
В. Ф. Юхименко, Ю. В. Якубовский

(Владивосток)

Приводятся результаты измерения локальных толщин и максимальной частоты следования волн пленки жидкости, стекающей по вертикальной трубе, методами иглы, электропроводности и скоростной киносъемкой.

Для решения многих задач гидродинамики и теплообмена в двухфазных потоках необходимо знать локальную толщину пленки, движущейся внутри труб. В настоящее время используются несколько методов замера толщины пленки. Обзор и оценка этих методов [1] показывают, что для определения характеристик волнового движения пленки жидкости внутри труб наиболее приемлемыми являются методы электропроводности, емкости и иглы. В данной работе сопоставляются результаты, полученные методами электропроводности, иглы и скоростной киносъемкой.

Характеристики пленочного движения определялись при гравитационном движении пленки жидкости по наружной поверхности вертикальной трубы диаметром 20 мм [2]. Методика замера толщины пленки методом иглы с использованием малоинерционного электронного счетчика импульсов приведена в работе [3]. Следует указать, что при выходе из волны игла вытягивает за собой жидкость. Скоростная киносъемка позволила определить время, в течение которого происходит вытягивание жидкостных нитей и их отрыв от острия иглы. Время существования нити  $1 \div 2$  мксек, а продолжительность погружения острия иглы в гребень волны  $6 \div 10$  мксек. Таким образом, принимая во внимание краткость существования жидкостного мостика, ошибкой, вызываемой этим эффектом, можно пренебречь.

Покадровая обработка киноплёнки позволила оценить возмущение, возникающее при входе иглы в пленку жидкости. Это возмущение при соприкосновении иглы с поверхностью пленки жидкости представляет собой волну, которая появляется перед иглой. Игла диаметром 0.2 мм образует перед собой волну, характеристики которой (длина, амплитуда) намного меньше характеристики мелкомасштабных волн пленки жидкости, поэтому можно принять, что игла не вносит существенную погрешность в результаты измерений.

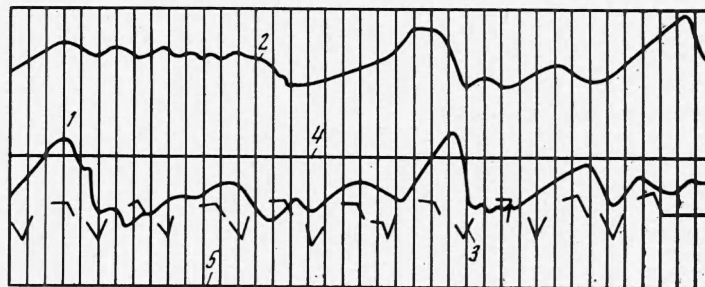
При проведении скоростной киносъемки не удалось получить четкой границы между пленкой и трубой, по которой течет жидкость. Для определения параметров течения на конце иглы была установлена масштабная тонкая пластина диаметром 3 мм. Расстояние от торца иглы до пластины измерялось под микроскопом. Перед проведением киносъемки с помощью микрометрического винта игла отводилась от стенки трубы на это расстояние. Киносъемка профиля пленки жидкости была выполнена в том же месте рабочего участка, где установлен датчик замеров толщины пленки методом электропроводности.

Для определения характеристик волнового движения пленки методом электропроводности был изготовлен трехканальный усилитель низкой частоты по ранее предложенной схеме [4]. Выход усилителя рассчитан на шлейфовый осциллограф Н-700. На вход усилителя подключены коаксиальные датчики, выполненные из латунной трубки внутренним диаметром 3 мм, в которую введен латунный электрод

диаметром 0.8 мм. Электрод изолирован от трубки шелковой нитью, пропитанной эпоксидной смолой.

Датчики тарировались в устройстве, подобном описанному в работе [4], состоящему из двух пластин диаметром 80 мм, расстояние между которыми изменялось с помощью микрометрического винта. Нижняя пластина изготовлена из латуни, верхняя — из материала, имеющего высокое электрическое удельное сопротивление и малую диэлектрическую постоянную. В латунную пластину вставлялись датчики и притирались таким образом, чтобы верхний торец датчика находился точно в плоскости пластины. В зазор между пластинами поступала вода из термостата. Электропроводность воды постоянно контролировалась кондуктометром.

В тарировочном устройстве была проведена тарировка датчиков в интервале несущих частот порядка  $3000 \div 8000$  гц при изменении входного напряжения от 0.1 до 1 в. Наиболее приемлемыми оказались характеристики датчиков при несущей частоте 5000 гц и входном напряжении 0.8 в. С увеличением частоты и входного напряжения возрастала точность измерения малых толщин пленки жидкости ( $0 \div 200$  мкм), но в значительной степени уменьшалась наибольшая толщина пленки, которая могла быть измерена. При уменьшении частоты ниже 3000 гц появлялись искажения выходного сигнала. Было замечено также, что с увеличением частоты и входного напряжения увеличивался начальный ток, так как при сухих пластинах и нулевом зазоре через датчик шел ток, обусловленный емкостью датчика. В опытах начальный ток при нулевом зазоре и сухих пластинах был равен 4.5 ма (входное напряжение 0.8 в, частота 5000 гц).



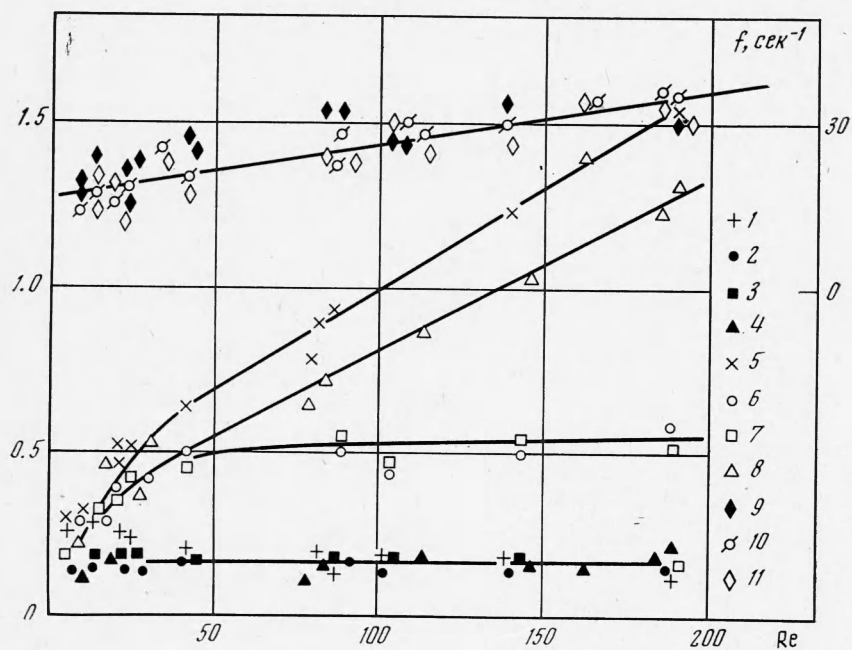
Фиг. 1

При тарировке особое внимание было уделено подбору материала для верхней пластины. Наиболее подходящим по диэлектрической постоянной и удельному сопротивлению материалом является гетинакс, однако при проведении тарировки выяснилось, что поверхностный слой гетинакса насыщался жидкостью, что приводило к большим погрешностям тарировки. По этой причине верхняя пластина была изготовлена из органического стекла, обладающего меньшей гигроскопичностью, чем гетинакс.

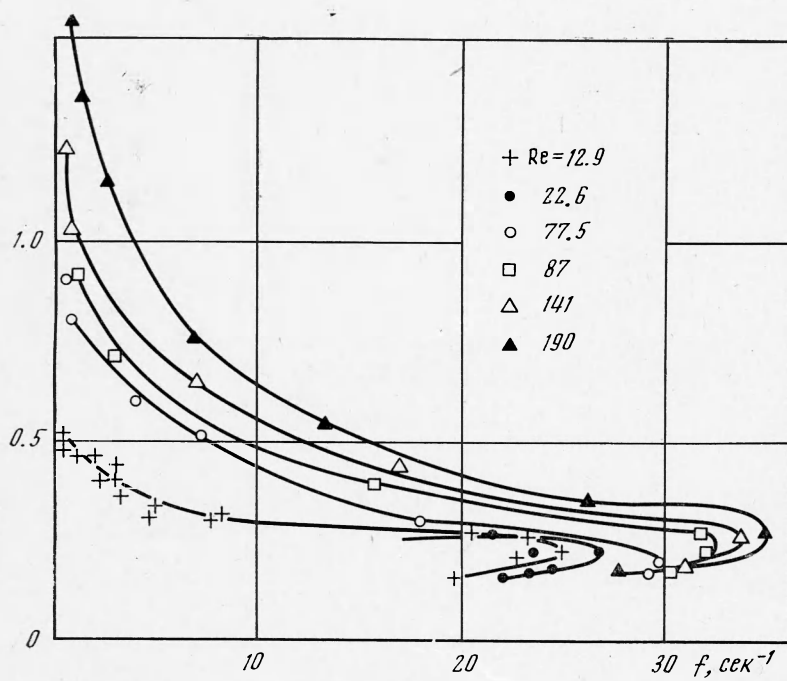
В качестве примера на фиг. 1 приведена оциллограмма измерения толщины пленки над датчиками, установленными на расстояниях 1200 и 1400 мм от входа жидкости в трубу (линии 1 и 2).

Для синхронизации киносъемки с записью толщины пленки на оциллографе один из гальванометров оциллографа включался последовательно в цепь с отметчиком времени кинокамеры (неоновой лампы). Проходящей в период горения лампы ток записывался на оциллографе (линия 3). Отметчик времени оциллографа Н-700 позволял определить значения толщины пленки во времени через 5 мсек. Перед началом эксперимента на сухой трубе зайчик от гальванометра, соединенного с датчиком, совмещался с зайчиком свободного гальванометра. Таким образом фиксировалось положение датчиков на сухой трубе. При обработке оциллограмм отсчет толщины пленки производился от «нулевых» линий 4 и 5.

Результаты замера толщины жидкостной пленки методами иглы, электропроводности и скоростной киносъемки приведены на фиг. 2, где точки 1—4 показывают минимальную толщину пленки ( $\delta_{\min}$ ), измеренную иглой, датчиками 1, 3 и скоростной киносъемкой соответственно; точки 5—8 — толщину пленки в гребне волны ( $\delta_{\max}$ ), измеренную соответственно иглой, датчиками 1, 3 и скоростной киносъемкой; точки 9—11 максимальную частоту следования волн, измеренную соответственно иглой и датчиками 1 и 3. Минимальная толщина пленки, замеренная этими методами, совпадала и оставалась постоянной, равной  $180 \div 200$  мкм, при изменении числа Рейнольдса  $Re = 13 \div 200$ . Максимальная толщина для всех трех методов совпадала до  $Re = 20$ . (Единица оси ординат соответствует  $10^{-3}$  м.)



Фиг. 2



Фиг. 3

С увеличением расхода жидкости ( $Re > 20$ ) наблюдалось совпадение максимальной толщины для метода электропроводности и киносъемки до  $Re = 45$ , в то время как замеренная иглой толщина резко возрастала, а замеренная датчиком — слабо. Это связано с тем, что при тарировке не учитывался волновой характер пленки. Скоростная киносъемка дала величину  $\delta_{\max}$  несколько ниже, чем величина  $\delta_{\max}$ , измеренная методом иглы. Это можно объяснить тем, что с увеличением  $Re$  возникают трудности в получении четкого снимка профиля пленки. Несколько большее значение толщины пленки в гребне волны, измеренной иглой, можно объяснить наличием около поверхности пленки слоя воздуха, насыщенного парами воды, и замыканием измерительной схемы через этот слой.

На фиг. 2 дано сопоставление изменения максимальной частоты следования волн при изменении  $Re$ . Из приведенных данных следует, что при всех рассмотренных режимах имеет место совпадение частот, полученных этими методами. При всех исследованных расходах поверхность пленки не была гладкой. С увеличением  $Re$  наблюдалось возрастание частоты следования волн.

Частота волн в зависимости от положения конца иглы над пленкой для разных расходов жидкости приведена на фиг. 3. Подсчет частоты волн по осциллограмме и сравнение точек с одинаковой частотой по высоте осциллограммы с данными кривыми позволили сопоставить толщины пленки, замеренные методами иглы и электропроводности.

Таким образом, при толщине пленки до 0.5 мм с достаточной степенью точности можно применить метод электропроводности с датчиками указанных размеров. При большей толщине лучшие результаты дают метод иглы и скоростная киносъемка.

Поступила 26 XII 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пермяков В. В., Зозуля Ю. М., Карастелев Б. Я., Банков В. К. Методы определения толщины пленки. Материалы научн.-техн. конф. «Вопросы теории и практики судовых энергетических установок». Владивосток, 1971.
2. Карастелев Б. Я., Зозуля Ю. М., Пермяков В. В., Банков В. К. Экспериментальные установки для исследования пленок жидкости. Тр. Дальневост. политехн. ин-та, 1972, т. 80.
3. Пермяков В. В., Подсушный А. М. Течение пленки жидкости под действием газового потока в горизонтальной трубе. Изв. вузов, Энергетика, 1970, № 9, стр. 85—89.
4. Яблоник Р. М., Лебедев О. Т., Хаимов В. А., Белобедов В. И. Разработка электронных приборов для измерения локальных параметров пленочного течения. Тр. ЦКТИ, 1970, вып. 99, стр. 45—54.

УДК 536.2.01

#### НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ С БЕСКОНЕЧНЫМ РЯДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

И. А. Иоффе

(Ленинград)

Рассмотрена задача нестационарной теплопроводности для полупространства, в котором расположен бесконечный ряд цилиндрических источников тепла, при граничном условии первого рода на поверхностях. Принято допущение о малости радиуса источников по сравнению с их шагом и ординатой центра.

1. Рассматриваемая задача является математической моделью процесса нестационарного теплообмена между полуограниченным массивным телом и рядом заложённых в нем трубопроводов, по которым протекает тепло- или хладоноситель. Практической реализацией данной модели являются такие широко применяемые теплообменные устройства, как почвенный обогрев теплиц и открытого грунта, некоторые системы лучистого отопления, обогреваемые полы зданий и т.п.

Соответствующая стационарная задача была частично решена в [1] (формула для расхода тепла). В [2] описано электрическое моделирование стационарного темпера-