

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЫВА ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ

В. В. Лозовецкий

(Москва)

Проведены исследования срыва жидкости с поверхности пленки, стекающей в вертикальном канале. Получены эмпирические зависимости, позволяющие количественно описать этот процесс.

Пленочные течения реализуются в различных тепло- и массообменных аппаратах, а также в ряде установок специального назначения как для целей теплопередачи, так и для их регулирования. Известно [1-3], что при умеренных плотностях орошения $\Gamma \leq 2.5 \text{ кг/м} \cdot \text{сек}$ и при небольших длинах вертикальных каналов $X \leq 3 \div 4 \text{ м}$ течение пленки жидкости при отсутствии спутного или встречного потока газа устойчиво и описывается зависимостями, однозначно связывающими характеристики пленок с начальной плотностью орошения и текущими параметрами: физическими свойствами, температурой и длиной пробега пленки. В [4] отмечалось, что при $R (X = 4.0) = (1.25X - 0.96) \cdot 10^3 \text{ с}$ поверхность пленки при ее чисто гравитационном течении начинает срывать жидкость. Это явление описывается качественно без каких-либо количественных зависимостей. Количественное описание процесса срыва жидкости необходимо, так как его учет при определении местных характеристик пленки и коэффициентов теплоотдачи к ней может привести к существенным ошибкам в расчетах.

В данной работе излагаются результаты исследования срыва жидкости с поверхности пленки при ее гравитационном течении внутри вертикального канала большой длины и распределения сорванной жидкости по его радиусу в различных сечениях по высоте.

Эксперименты проводились на установке, описанной в [4]. Рабочий участок установки длиной 19 м и диаметром 54 мм изготовлен из стали 1X18H9T. Для определения количества сорванной жидкости и ее распределения по радиусу канала использовались цилиндрические отборники диаметром от 10 до 50 мм.

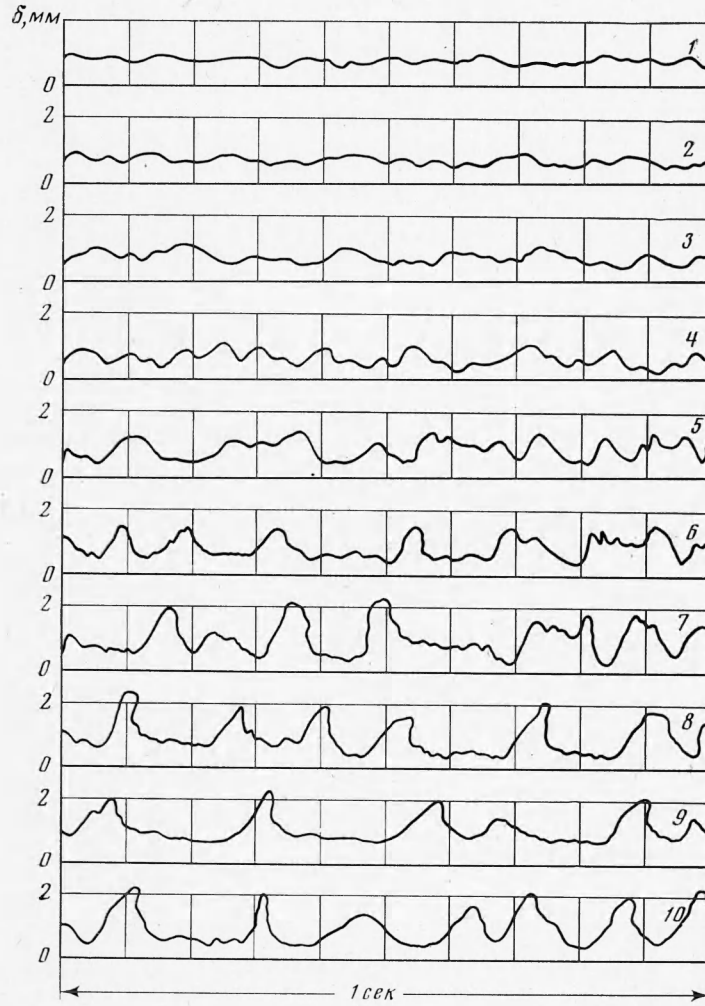
Отборники устанавливались на расстоянии 2 ÷ 3 мм ниже среза сечения, в котором осуществлялись измерения, что исключало их влияние на гидродинамическую обстановку внутри канала. Сорванная жидкость через отборники поступала на аналитические весы, а жидкость, стекающая в виде пленки, возвращалась на вход рабочего участка. Общий расход жидкости замерялся протарированной нормальной диафрагмой.

Исследования проводились в диапазоне изменения плотностей орошения $0.327 \text{ кг/м} \cdot \text{сек} \leq \Gamma \leq 8.64 \text{ кг/м} \cdot \text{сек}$, который соответствует при температуре орошающей жидкости, равной $15 \div 30^\circ \text{C}$, изменению чисел Рейнольдса от 400 до 11 000. Замеры проводились в трех сечениях по длине канала, расположенных на расстояниях 3, 6, 16 м от входа жидкости на рабочий участок.

Визуальные наблюдения и осциллографическая запись течения пленки (фиг. 1) показали, что при заданной плотности орошения на ее поверхности образуются волны, высота которых растет с увеличением длины пробега пленки [3]. На фиг. 1 представлены осциллограммы поверхности пленки при $\Gamma = 0.814 \text{ кг/м} \cdot \text{сек}$. Кривые 1-10 относятся к значениям $X = 100, 400, 600, 1000, 1200, 1400, 1800, 2200, 2600, 3000 \text{ мм}$ соответственно. По мере стекания происходит превращение потенциальной энергии жидкости в кинетическую, растет скорость движения и площадь поверхности волн, а следовательно, и сопротивление, которое оказывает неподвижный воздушный стержень волнистой поверхности. Это в свою очередь ведет к дальнейшему увеличению высоты волн и деформации их переднего фронта, который становится обрывистым (фиг. 1) Срыв жидкости с поверхности пленки наступает, когда усилие, действующее на поверхность волны, превышает силы сцепления основания волны с непрерывным невозмущенным слоем жидкости. Сорванная жидкость движется под действием силы тяжести внутри вертикального канала и распределяется по радиусу последнего.

На фиг. 2 показано изменение расходной концентрации жидкости $(g_i - g_{i-1}) / (F_i - F_{i-1})$ по радиусу канала в трех сечениях по его высоте (для а $X = 3 \text{ м}$, б $X = 6 \text{ м}$, в $X = 16 \text{ м}$). Разность величин в числителе этого выражения есть разность между количеством сорванной жидкости g_i в кг/сек , зафиксированным i -м отборником, и количеством жидкости g_{i-1} в кг/сек через отборник $i - 1$, т. е. весовой расход жидкости через площадь кольца, образованного i и $i - 1$ отборниками, равную $F_i - F_{i-1}$ в м^2 . Точки, обозначенные на фиг. 2 цифрами 1-10, соответствуют значениям величины $\Gamma = 8.64, 6.5, 4.86, 3.1, 2.25, 1.632, 1.308, 0.981, 0.654, 0.327$.

Анализ приведенных на фиг. 2 результатов свидетельствует о том, что некоторое количество жидкости имеется в центре канала при числах Рейнольдса, меньших чисел Рейнольдса, характеризующих начало срыва при стекании жидкости по наружной поверхности вертикального канала и определенных в [4]. Однако эта величина не превышает долей процента и может быть отнесена к случайному срыву. В центре цилиндрического канала имеется практически равномерное распределение сорванной жидкости по радиусу с резким возрастанием расхода в пристеночной области шириной



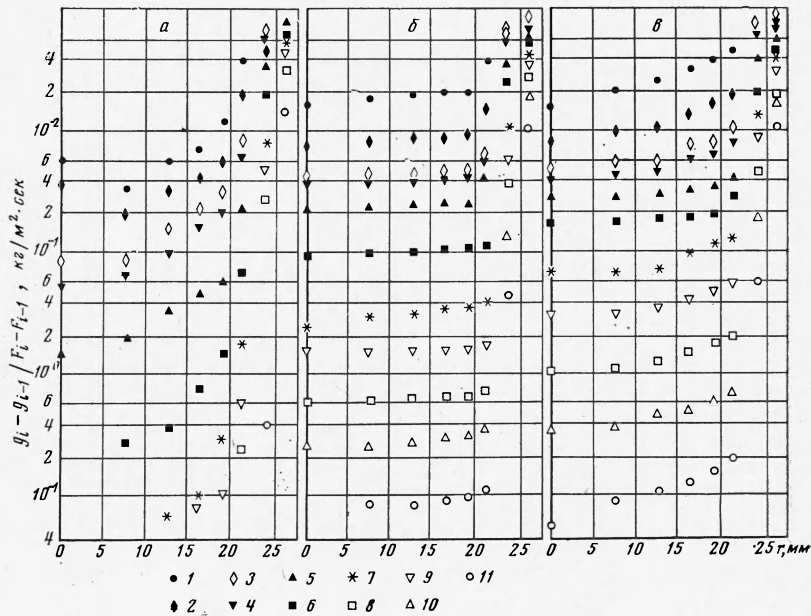
Фиг. 1

2—5 мм, что вызвано захватом гребней волн улавливающими отборниками. Увеличение плотности орошения ведет к росту количества сорванной жидкости в центре канала во всех трех его сечениях, причем область больших градиентов несколько сдвигается к центру соответственно увеличению средней толщины пленки и высоты выступов волн. Особенно заметно это на фиг. 2, в, относящейся к сечению, расположенному на расстоянии $X = 16$ м от входа жидкости на рабочий участок, где при прочих равных условиях высота волн имеет наибольшее значение.

Количество сорванной жидкости в центральной части канала, как следует из фиг. 2, увеличивается с длиной пробега пленки X . При наибольших исследованных плотностях орошения $\Gamma = 6.5-8.64$ кг/м·сек на долю центральной части канала, ограниченной диаметром отборника 40 мм, приходится от 15 до 25% жидкости, подаваемой на вход рабочего участка (фиг. 3, 4). Обозначения те же, что и на фиг. 2, $X = 6$ и 16 м соответственно. Это необходимо учитывать при расчете средней тол-

щины пленки, высоты выступов волн, толщины непрерывного слоя, частоты волнового движения и других характеристик путем внесения соответствующих поправок в значения плотности орошения по длине канала.

Из фиг. 3, 4 следует, что общее количество сорванной жидкости, отнесенное к начальному расходу, увеличивается с ростом плотности орошения и по радиусу канала, который на этих фигурах представлен в безразмерном виде $\xi = r / r_0$, где r в мм —



Фиг. 2

текущее значение радиальной координаты; r_0 — внутренний радиус канала. Кривые, обобщающие опытные точки, на указанных фигурах описываются до значений $\xi \leq 0.84$ общей зависимостью вида

$$(1) \quad g_i / G = f(\xi^n; \Gamma)$$

где g_i в кг/сек — расход жидкости через отборник, G в кг/сек — полный начальный расход.

Показатель степени n на участке течения жидкости $6 \text{ м} \leq \bar{X} \leq 16 \text{ м}$ линейно зависит от длины пробега пленки

$$(2) \quad n = 2.14 + 0.01 X$$

Зависимости (1) и (2) справедливы в области $\xi < 0.84$, соответствующей свободному падению сорванной жидкости. При $\xi > 0.84$ жидкость для большинства исследованных режимов движется в пленке, отборник диаметром 50 мм попадает в гребни волн, что ведет к росту расхода жидкости через него и соответствует резкому увеличению наклона кривых на фиг. 3, 4.

На фиг. 5 в полулогарифмическом масштабе изображено количество жидкости g_i / G , отнесенное к полному начальному расходу, попавшее в отборники различного диаметра, в зависимости от плотности орошения Γ . Точки, отмеченные цифрами 1—7, получены отборниками диаметром 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50 мм; а, б, в относятся к $X = 3, 6, 16 \text{ м}$.

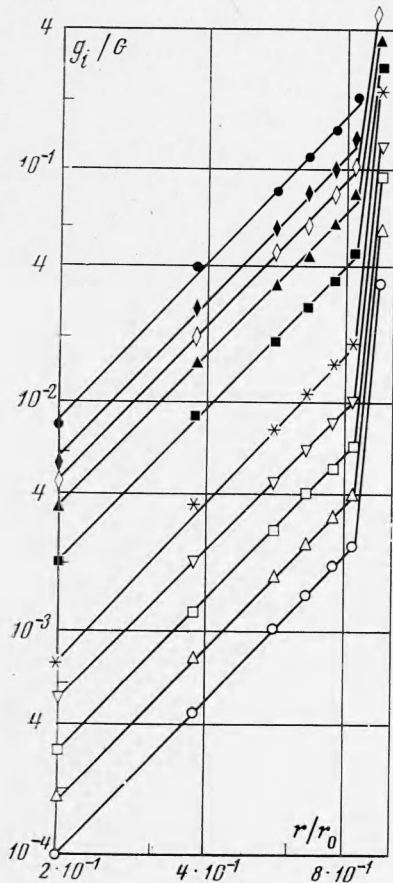
Количество сорванной жидкости, попадающей в насадки, увеличивается с ростом плотности орошения Γ и может быть определено с учетом уравнений (1) и (2) выражением

$$(3) \quad g_i / G = \xi^n \exp(A + B\Gamma)$$

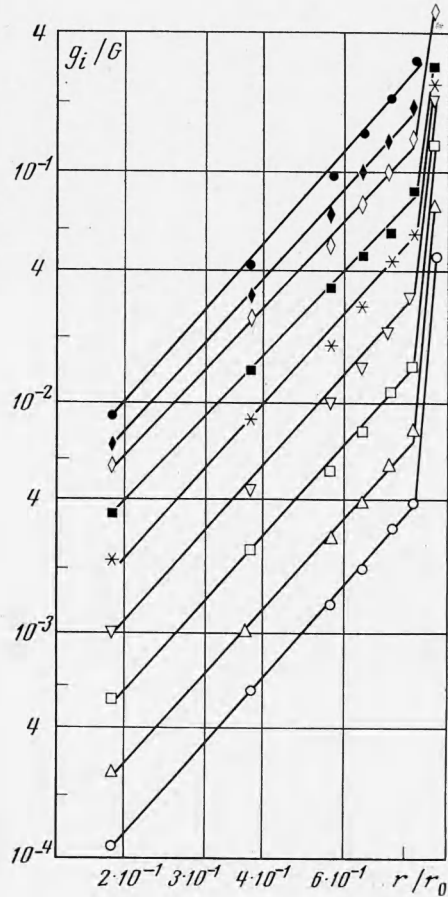
где A и B — постоянные коэффициенты.

Из фиг. 5 следует, что при длине пробега пленки жидкости $X > 3$, соответствующей для большинства исследованных плотностей орошения согласно данным [2,3] длине

участка стабилизации волнового движения, коэффициент B , характеризующий наклон линий, остается постоянным в каждом из исследованных сечений и не зависит от диаметра отборника. Однако в сечении $X = 6$ м при $\Gamma \geq (2.0 \div 2.2)$ кг/м·сек и в сечении $X = 16$ м при $\Gamma \geq (1.8 \div 2.0)$ кг/м·сек происходит резкое снижение скорости приращения сорванной жидкости, о чем свидетельствует уменьшение наклона кривых и соответственно коэффициента B . Это явление объясняется насыщением процесса



Фиг. 3



Фиг. 4

срыва с поверхности пленки после срыва «лишнего» [количества жидкости и увеличивающейся, начиная с некоторой плотности орошения, возвратной сепарацией жидкости на поверхность стекающей пленки. Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что процесс срыва жидкости с поверхности пленки в области длин ее пробега, соответствующих $X \geq (6 \div 16)$ м, не носит лавинообразный характер.

На фиг. 6 опытные данные, представленные на фиг. 5, обработаны в координатах $[(g_i/G) / \xi^n; \Gamma]$. Кривые 1, 2 относятся к значениям $X = 16, 6$ м. Получены зависимости, позволяющие определить количество сорванной с поверхности пленки жидкости и распределение последней по радиусу вертикального цилиндрического канала. Для области плотностей орошения $\Gamma < (1.8 \div 2.2)$ кг/м·сек зависимость имеет вид

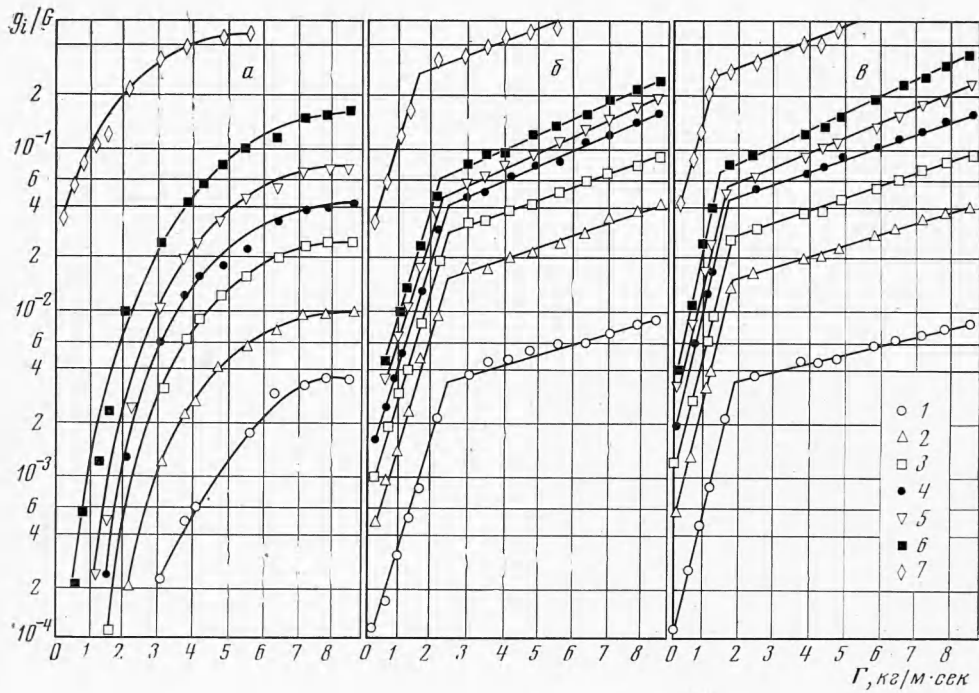
$$(4) \quad g_i / G = \xi^{2.14+0.01X} \exp [\Gamma (1.14 + 0.06X) - 6]$$

Для области плотностей орошения $1.8 \div 2.2$ кг/м·сек $< \Gamma \leq 8.64$ кг/м·сек

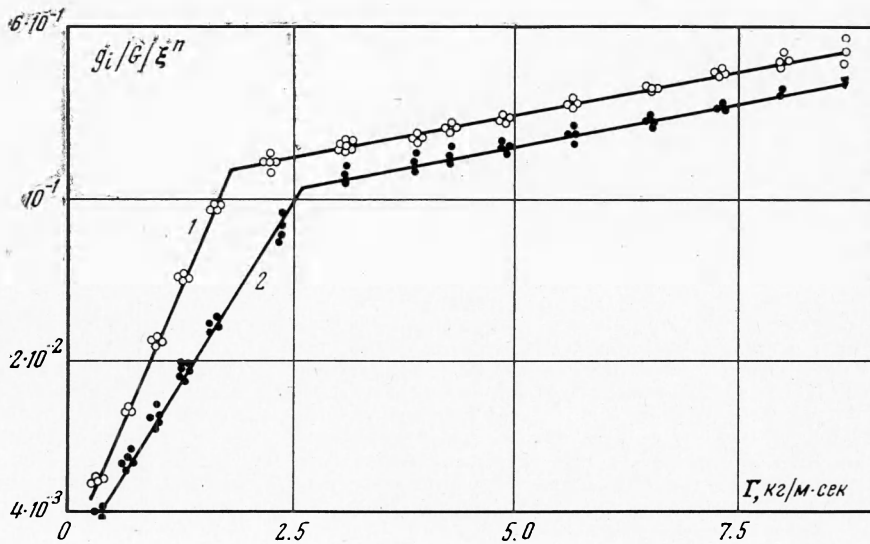
$$(5) \quad g_i / G = \xi^{2.14+0.01X} \exp[0.177\Gamma - (2.17 + 0.03X)]$$

Выражения (4) и (5) справедливы при $X > 3$ м, т. е. в условиях установившегося пленочного течения.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что благодаря возвращению сорванной жидкости на поверхность пленки в случае течения внутри вертикального канала большой длины, стекание последней характеризуется ярко выраженной тен-



Фиг. 5



Фиг. 6

денцией к стабилизации по длине канала, в частности коэффициенты при X в уравнениях (4) и (5) имеют малое значение. В результате движение пленки жидкости по внутренней поверхности канала более устойчиво, чем при течении по наружной поверхности, когда естественная сепарация в пленку практически отсутствует.

Поступила 12 II 1974

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 ÷ 2 мксек, а продолжительность погружения острия иглы в гребень волны 6 ÷ 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