

С.Г.КОВЧУР, канд.техн.наук (Витебск. технол. ин-т легк. пром.)
А.М.ЛАПИН, инж.,

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ АНАЛОГИИ МЕЖДУ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНОМ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ

В различных технологических процессах, в которых имеют место химические или электрохимические реакции между обрабатываемым материалом и движущимся раствором (электролитом), приходится сталкиваться с необходимостью расчета процессов конвективной диффузии. Так, при химической полировке стекла, химическом фрезеровании металлов, коррозии в замкнутых контурах АЭС скорость полировки, фрезерования или коррозии определяется доставкой реагентов к поверхности и отводом продуктов реакции, т.е. конвективной диффузией. Для расчета процессов конвективной диффузии используют данные по теплообмену.

Из аналогии процессов тепло- и массообмена следует, что уравнение конвективной диффузии может формально совпадать с уравнением теплопереноса.

Однако не всегда можно переносить результаты теории теплообмена на массообмен. Это объясняется различием в значениях Sc и Pr , что физически означает разницу в толщинах диффузионного и теплового пограничных слоев. Математически разница в значениях Sc и Pr приводит либо к возможности пользоваться разложениями функции в ряды, либо к необходимости численного решения. Поэтому вопрос о границах применимости аналогии между тепло- и массообменом нуждается в экспериментальной проверке. Исследованию данного вопроса посвящен целый ряд работ [1–5]. Однако ни в одной из них не ставилась задача экспериментального исследования границ применимости аналогии между тепло- и массообменом при расчете процессов конвективной диффузии.

Исследовался массообмен между поверхностью цилиндра, покрытого равномерным слоем нафталина, и обтекающим его поперечным потоком воздуха. Причем цилиндр располагался в горизонтальной плоскости. Выбор цилиндра в качестве обдуваемой модели связан со следующим. Во-первых, на поверхности цилиндра существуют два принципиально отличающихся и прак-

тически важных участка: лобовой, безотрывно обтекаемый градиентным потоком, и кормовой, находящийся в зоне отрыва. Во-вторых, для цилиндра имеются надежные данные по теплообмену. Были измерены не только суммарные, но и локальные коэффициенты массопереноса.

Установка, на которой проводился эксперимент, состоит из вентилятора, трубы прямоугольного сечения с выравнивающей сеткой. Рабочая часть трубы представляет собой открытое сужающееся сопло сечением 52x110 мм. Кроме того, имеется устройство для быстрого закрепления, реостат для регулирования числа оборотов крыльчатки и блок питания.

Цилиндр диаметром 12 мм устанавливался на расстоянии 15 мм от среза сопла. Поле скоростей в плоскости расположения цилиндра было измерено трубой Прандтля и оказалось достаточно равномерным. Расплавленный нафталин наносился на цилиндрический образец. Толщина слоя составляла 1,0–1,5 мм. Суммарный массообмен определяли путем взвешивания цилиндра до и после опыта на аналитических весах типа АДВ-200 м с точностью до 0,0001 г.

Локальные коэффициенты массопереноса по окружности цилиндра измерялись путем обмера радиуса до и после опыта в двух сечениях, расположенных в средней части цилиндра на расстоянии 25 мм друг от друга. Измерение радиуса проводилось с помощью измерительного микроскопа типа ММИ-1 с интервалом 15° , а в зоне отрыва потока — через $7^\circ 30'$. Для повышения точности и надежности радиус измерялся двумя методами: проекционным в проходящем свете и контактным — путем касания измеряемой поверхности датчиком с малым усилием соприкосновения (10–20 г).

Однородный образец (с эллиптичностью не более 3%) быстро обмерялся на микроскопе, взвешивался на всех весах, ввинчивался в отверстие держателя и подвергался обдуванию воздухом. Длительность опыта была порядка 1 ч и устанавливалась опытным путем из расчета убыли массы на 0,1–0,2 г. В конце опыта снова проводились взвешивание и обмер образца. Все эксперименты, где сублимация доходила до металлической основы, браковались.

В ходе опытов измерялись температура воздуха (с точностью $0,2^\circ\text{C}$), барометрическое давление (с точностью 1 мм рт.ст.), скорость воздуха (с точностью 6%).

В соответствии с теорией подобия опытные данные обобщались в виде зависимости $Nu = f(Re, Sc)$.

Здесь $Nu = \frac{a d}{D}$ — массообменный критерий Нуссельта. $Re = \frac{W d}{\nu}$ — критерий Рейнольдса; $Sc = \frac{\nu}{D}$ — критерий Шмидта (аналог критерия Прандтля при теплообмене). Коэффициент массообмена определялся по формуле $a = \frac{\Delta m}{F \tau C_s}$, где Δm — масса сублимированного нафталина, кг; $F = \pi d l$ — площадь сублимирующей поверхности, м^2 ; d — диаметр цилиндра; l — его длина; τ — время сублимации, с; C_s — концентрация паров нафталина у поверхности, $\text{кг}/\text{м}^3$. Последняя определялась из выражения $(C_s = P_s / RT)$, где $P_s = f(T)$ — давление насыщения паров нафталина по методике [9]; T — температура воздуха; $R = 64,8 \text{ дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$ — газовая постоянная паров нафталина.

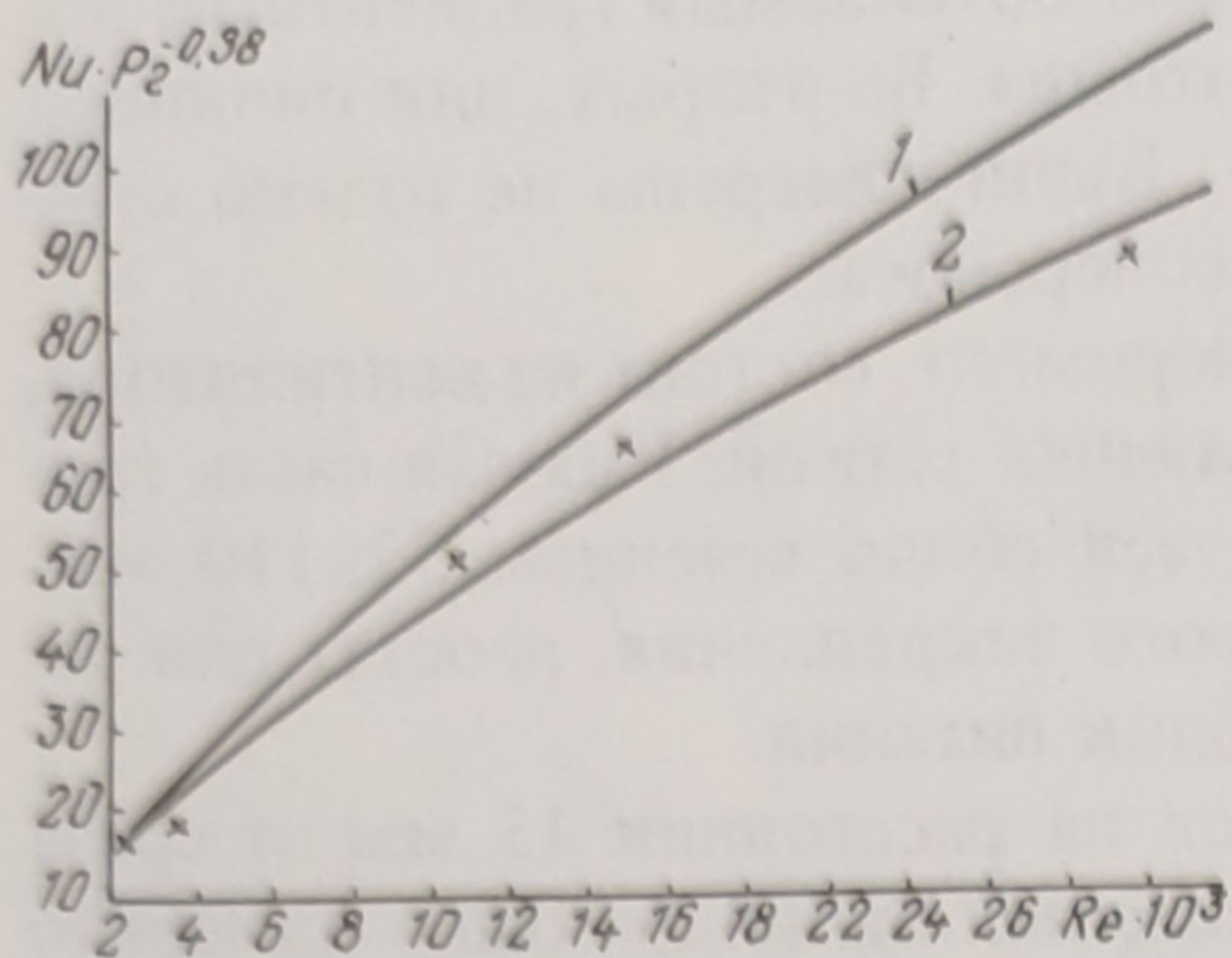


Рис. 1. Массообмен цилиндра при различных числах:

x — экспериментальные значения; 1 — данные по теплообмену [10]; 2 — данные по теплообмену [12].

Ввиду малой концентрации паров нафталина в выходной струе воздуха вязкость ν смеси воздуха с парами нафталина принималась равной вязкости чистого воздуха по данным [10]. Коэффициент диффузии паров нафталина

в воздухе определялся согласно [11] из выражения $D = \frac{\nu}{Sc}$ м²/с, где $Sc = 2,57$.

Погрешность критерия Re не превышала 8%, критерия Nu — 2,5%. Локальные коэффициенты a_i определялись из уравнения материального баланса по формуле

$$a = \Delta r_i = \frac{S_H}{\tau C_s}$$

Здесь Δr_i — изменение радиуса цилиндра за время опыта в рассматриваемой точке поверхности; $S_H = 1 = 60$ кг/м³ — плотность твердого нафталина. На рис. 1 приведены результаты опытов по определению суммарного массообмена между поверхностью цилиндра, покрытого нафталином, и обтекающим его поперечным потоком воздуха при различных скоростях потока. На том же графике нанесены данные работ [10] и [12], полученные при изучении теплообмена.

Расхождений между полученными экспериментальными данными и результатами по теплообмену практически не наблюдалось. Несовпадение опытных данных в работах [10] и [12], как и в ряде других работ по теплообмену, объясняется влиянием не учтенных при обработке опытов параметров (например, степени турбулентности потока). На рис. 2 приведены данные по измерению локальных коэффициентов массообмена для трех значений критерия Re . Как видно из рисунков, распределение значений a_i по окружности цилиндра практически совпадает с известными эпюрами коэффициента теплообмена α , приведенными в работах [12], [13]. Количественное совпадение результатов (с учетом различия чисел Sc и Pr) вполне удовлетворительное.

Таким образом, экспериментальное исследование процессов диффузии подтвердило, что при малых концентрациях и небольших перепадах температур аналогия между тепло- и массообменом справедлива как при безотрывном градиентном течении, так и в зоне отрыва потока.

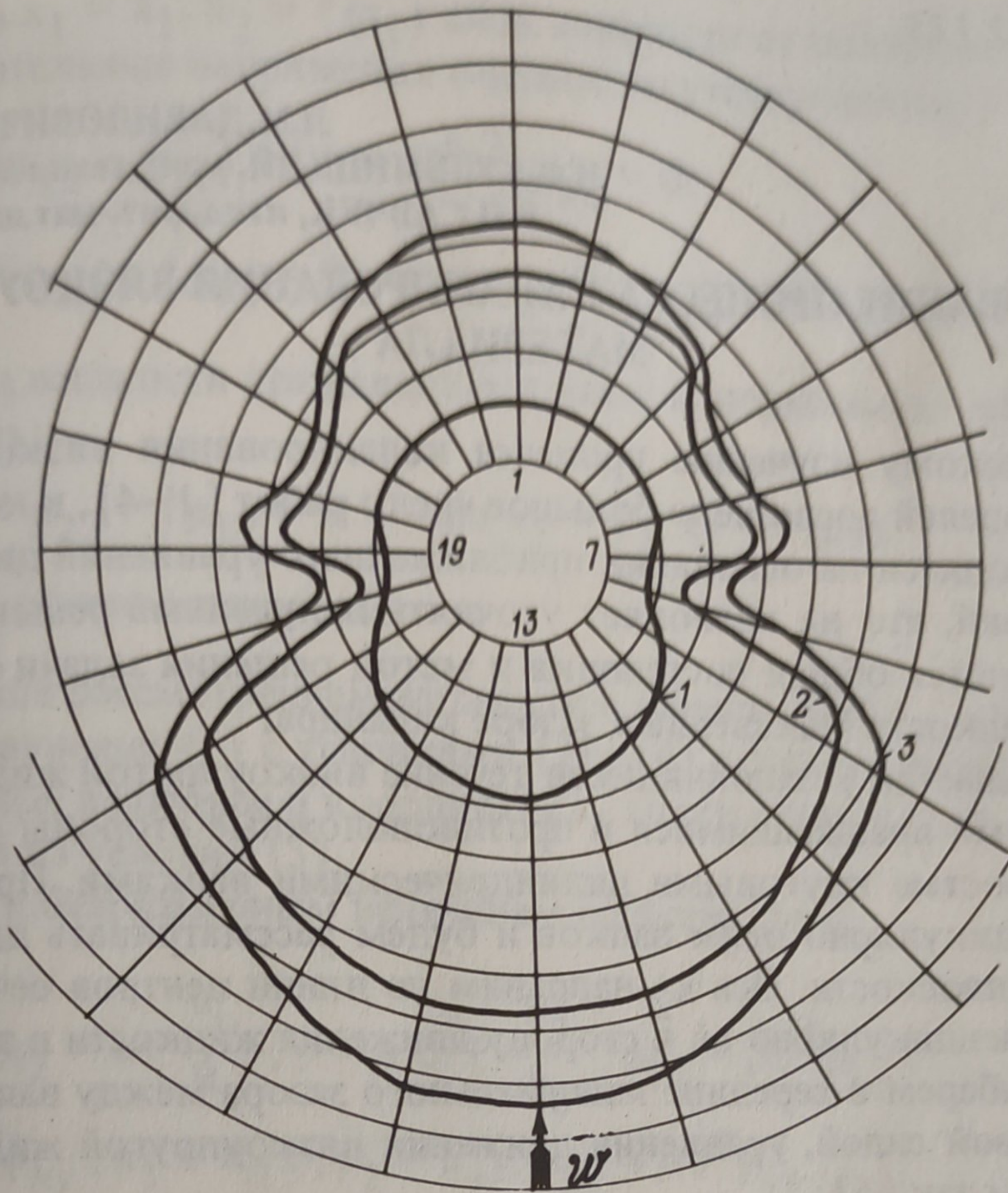


Рис. 2. Распределение значений локального коэффициента массообмена по периметру цилиндра при поперечном омывании (опыт № 1, модель № 2):
 1 — при $Re = 2020$; 2 — при $Re = 10500$; 3 — при $Re = 14400$. Для 1 — $3\mu\alpha = 1\text{ мм} = 0,001\text{ м/с}$.

В заключение необходимо отметить, что использование аналогии между тепло- и массообменом для случая расчетов процессов конвективной диффузии является весьма плодотворным и позволяет использовать для расчета массообмена имеющийся в специальной литературе обширный экспериментальный материал по теплообмену.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стелл Д.Р. Таблица давления паров индивидуальных веществ И.Л7,21949.
2. Кутателадзе, Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. — М., 1959.
3. Сполдинг Д.Б. Конвективный массоперенос. М-П-1963.
4. Михеев М.А. Основы теплопередачи. — М., 1956.
5. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. — М., 1961.