

УДК 532.526.:536.24

© 1991 г.

И. И. КОЗЛОВ, А. А. ШУГАЙ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРЕНИЯ О ЛЕД

Сухое трение твердых тел при высокой относительной скорости  $U$  может сопровождаться переходом тел в зоне фрикционного контакта в пластическое и жидкое состояние [1]. При пренебрежении образованием пластической прослойки обычно выделяют в зависимости от  $U$  три различных механизма трения. Сухое трение — невысокие относительные скорости и температура в зоне фрикционного контакта всюду ниже меньшей из температур плавления материалов трущихся тел  $T_m$ . Режим граничной смазки — максимальная температура в зоне контакта  $T_{max} > T_m$ , но толщина образующихся островков расплава  $\delta$  меньше характерного размера шероховатости поверхностей. Стадия развитого жидкого слоя — достаточно высокая относительная скорость  $U$ , температура в зоне контакта всюду больше или равна  $T_m$  и толщина жидкого слоя  $\delta > (10^{-4} - 10^{-5})$  см.

Стадии граничной смазки и сухого трения подробно изучены экспериментально и теоретически [1–3]. Для построения теории, дающей хорошее количественное совпадение с экспериментом, здесь достаточно простых энергетических оценок. При теоретическом изучении стадии развитого жидкого слоя необходимо совместное решение уравнений гидродинамики и уравнения притока тепла с дополнительными граничными условиями на поверхности фазового перехода. Прямое исследование связанных гидродинамической и тепловой задач оказывается весьма сложным. Известны упрощающие подходы основанные на использовании метода интегральных соотношений теории пограничного слоя [4–6]. Экспериментальные исследования режима развитого жидкого слоя при высокоскоростном трении твердых тел отсутствуют.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению режима развитого жидкого слоя и проверке результатов, полученных в [5, 6] методом интегральных соотношений.

1. Экспериментальная установка. В работе исследуется высокоскоростное трение о ледяной образец плоского металлического кольца (внутренний радиус  $R = 13,5$  см, внешний 16,5 см), вращающегося с угловой скоростью  $\omega \sim 1000$  рад/с. Ледяной образец представляет собой полый цилиндр: внутренний радиус 13,5, внешний 16,5, высота 5 см. Целью проведения экспериментов является получение зависимостей коэффициента момента  $C_M$  и скорости проплавления  $v_0$  от  $\omega$

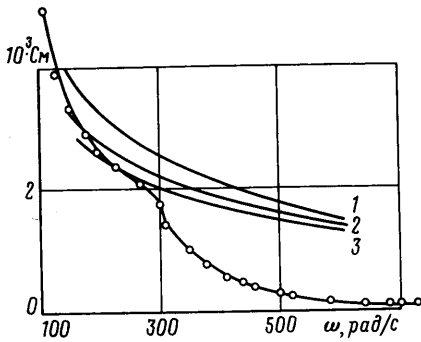
$$C_M = \frac{M}{\rho \omega^2 R^5} = \frac{I \dot{\omega}}{\rho \omega^2 R^5}, \quad v_0 = -\dot{h}$$

Здесь  $\rho$  — плотность воды,  $I$  — момент инерции кольца,  $h$  — высота образца.

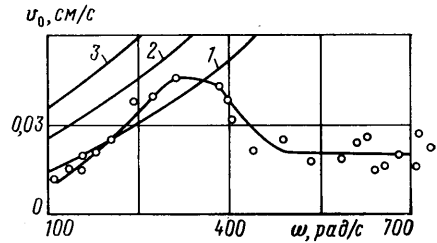
Экспериментальная установка состоит из трех основных узлов: крутильная установка, следящая система и аппаратура оперативного наблюдения, блоки измерительно-вычислительного комплекса.

Подробное описание измерительной установки — ротационного вискозиметра — изложено в [7, 8].

Следящая система служит для измерения угловой скорости вращения и вертикального перемещения кольца. Она состоит из датчика оборотов



Фиг. 1



Фиг. 2

и телевизионной системы измерения перемещения кольца. На зачерненную реборду кольца наносится несколько полированных равноудаленных меток. При вращении кольца метка, проходя под системой светодиода — фотодиод (датчик оборотов), вызывает импульс в цепи фотодиода. Измерение временных интервалов между импульсами позволяет определить угловую скорость вращения. Угловое ускорение находится затем численным дифференцированием с использованием регуляризирующих алгоритмов. Система измерения перемещения состоит из источника света, системы шторок, телевизора, телекамеры и компаратора. Система шторок формирует на экране телевизора светлый прямоугольник, одно из оснований которого и две боковые стороны фиксированы, а положение другого основания связано с вертикальной координатой кольца. Компаратор выделяет из видеосигнала телекамеры пакеты импульсов, причем количество импульсов в пакете соответствует количеству светлых строк на экране телевизора, т. е. высоте светлого прямоугольника. Градуировка системы позволяет связать количество строк в пакетах импульсов с вертикальной координатой кольца. Измерения вертикальной координаты проводятся с частотой 50 Гц. Скорость проплавления кольцом ледяного образца  $v_0$  определяется затем численным дифференцированием. Подробнее принцип работы телевизионной системы измерения перемещений изложен в [9].

Аппаратура оперативного контроля предназначена для наблюдения за ходом эксперимента, выдачи синхронизирующего сигнала начала эксперимента на измерительно-вычислительный комплекс.

Комплекс включает ЭВМ СМ-4, модули аппаратуры САМАС, два коммутатора. Блоки измерительно-вычислительного комплекса обеспечивают измерение временных интервалов между метками, подсчет количества видеопульсов в пакетах и синхронизацию их в реальном времени. Использование коммутаторов позволяет довести мертвое время следящей системы до нескольких микросекунд.

Для обслуживания эксперимента создан комплекс программ проведения и обработки результатов эксперимента. Поставленные методические опыты показали линейность системы измерения перемещений и высокую разрешающую способность всей следящей системы: абсолютная погрешность измерения временных интервалов между метками на кольце  $\sim 4 \cdot 10^{-8}$  с (относительная погрешность  $\sim 0,1\%$ ); абсолютная погрешность измерения вертикального перемещения кольца  $\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$  см (относительная погрешность  $\sim 1\%$ ).

Подробное описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов имеется в [10].

**2. Результаты экспериментов.** Опыты по изучению трения с фазовым переходом проводились на ледяных образцах, изготовленных из отстоен-

ной водопроводной воды. На фиг. 1 и 2 приведены результаты типичного эксперимента. Здесь же для сравнения приводятся результаты теоретических расчетов [5, 6] для проплавления ледяного образца вращающимся с постоянной угловой скоростью  $\omega$  кольцом при заданном значении температуры его нижней поверхности  $T_0$  (кривые 1–3 соответствуют  $T_0 = -3, 7, 11^\circ \text{C}$ ). Измерение температуры нижней поверхности кольца в ходе эксперимента не проводилось. Но совместное измерение двух независимых параметров  $C_M$  и  $v_0$  и сравнение их с теорией позволяет найти  $T_0$  и оценить совпадение теоретических и экспериментальных результатов. При  $\omega$  из диапазона [0,300 рад/с] оба экспериментальных значения оказываются близки к теоретическим значениям  $C_M(\omega, T_0)$  и  $v_0(\omega, T_0)$  для некоторой температуры  $T_0(\omega)$  (различие не превосходит 20%). Таким образом, сравнение экспериментальных и теоретических кривых показывает хорошее качественное и количественное соответствие при  $\omega < 300$  рад/с ( $v < 50$  м/с).

Простые оценки показывают, что тепловая задача для кольца близка к одномерной и квазистационарной, т. е. профиль температуры близок к линейному по вертикальной координате (кольцо изготовлено из дюралюминия и имеет в сечении прямоугольник со сторонами 0,5 и 3 см). Используя вычисленный в [5, 6] профиль температуры в слое расплава, нетрудно определить тепловой поток из кольца в область жидкой прослойки, а затем и температуру верхней поверхности кольца  $T_1$ . Величина  $T_1$  оказывается ниже «точки росы» для условий помещения; конденсация пара на верхней стороне кольца в ходе эксперимента служит косвенным подтверждением сделанных оценок.

При относительных скоростях скольжения  $v > 50$  м/с ( $\omega > 300$  рад/с), по всей видимости, имеет место отличный от развитого жидкого слоя механизм трения. Экспериментальное значение  $C_M$  примерно на порядок ниже теоретического значения. При  $\omega > 500$  рад/с тормозящий момент  $M$  практически не зависит от  $\omega$ :  $M \approx 1,5 \cdot 10^7$  г·см<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, скорость проплавления также близка к постоянной  $v_0 \approx 0,02$  см/с.

В заключение авторы благодарят Г. Г. Черного за внимание к работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов А. П. Фрикционный разогрев и образование пластической и жидкой прослоек в зоне скользящего контакта твердых тел // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 280–285.
2. Будневич С. С., Дерягин Б. В. О скольжении твердых тел по льду // ЖТФ. 1952. Т. 22. № 12. С. 1967–1980.
3. Oksanen P., Keinonen J. The mechanism of friction of ice // Wear. 1982. V. 78. № 3. P. 315–324.
4. Черный Г. Г. Движение плавящегося твердого тела между двумя упругими полупространствами // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282. № 4. С. 813–818.
5. Шугай А. А. Трение твердых тел с образованием слоя расплава // Отчет НИИ механики МГУ № 3668. М.: Изд-во МГУ, 1988. 59 с.
6. Шугай А. А. Задача о проплавлении твердого полупространства вращающимся нагретым диском и кольцом // Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 3. С. 30–34.
7. Якимов Ю. Л., Денисов А. И., Ставский Ц. И., Архангельский Е. А. Способ определения сил трения твердого тела о жидкость: А. с. № 1033936 СССР // Оpubл. в Б. И. 1983.
8. Якимов Ю. Л., Рыжов А. Б., Жарков Г. М. и др. Экспериментальный метод определения силы вязкого трения при больших скоростях // Отчет НИИ механики МГУ. № 2627. М.: Изд-во МГУ, 1982. 37 с.
9. Шарафутдинов Г. З., Жуков А. И., Меснянкин Ю. Г. Телевизионное устройство для измерения линейных размеров объекта: А. с. № 1231631 СССР // Оpubл. в Б. И. 1986. № 18. С. 260.
10. Шарафутдинов Г. З., Жуков А. И., Козлов И. И., Шугай А. А. Экспериментальное изучение высокоскоростного трения твердых тел с образованием слоя расплава // Отчет НИИ Механики МГУ. № 3918. М.: Изд-во МГУ, 1990. 65 с.