

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ¹

NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN THE LUBRICANT LAYER

V. Akhmetov

Summary. The problem of heat transfer in the lubricant layer of a sliding bearings at moderate Reynolds numbers is investigated. The main flow was calculated using the complete system of Navier-Stokes equations. The temperature distribution in the flow was determined from the heat balance equation taking into account the calculated velocity field. A significant inhomogeneity of the temperature field is shown.

Keywords: heat transfer, swirling flows, viscous fluid, lubrication theory, finite-difference method, recirculation zones.

Ахметов Вадим Каюмович

Д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский государственный
строительный университет»
vadim.akhmetov@gmail.com

Аннотация. Исследована задача о теплопереносе в смазочном слое опоры скольжения при умеренных числах Рейнольдса. Расчет основного течения проводился с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса. Распределение температуры в потоке определялось из уравнения баланса тепла с учетом рассчитанного поля скоростей. Показана существенная неоднородность температурного поля.

Ключевые слова: теплоперенос, закрученные потоки, вязкая жидкость, теория смазки, конечно-разностный метод, рециркуляционные зоны.

Исследование процессов теплопереноса в смазочном слое является актуальной задачей в связи с разработкой современных опор скольжения. Расчеты гидродинамических характеристик при этом, как правило, основываются на модели Стокса, которая имеет ограниченные возможности применения и позволяет с достаточной точностью получать результаты только при малых числах Рейнольдса. Границы применимости такой модели и диапазон чисел Рейнольдса, при котором возможно использование классической теории смазки, представлены в работе [1]. При умеренных и высоких значениях чисел Рейнольдса требуется проведение расчетов с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса.

В данной работе исследуется задача теплопереноса в смазочном слое опоры скольжения, для которой гидродинамический расчет основного течения проведен в полной постановке с учетом нелинейных членов в уравнении движения жидкости.

1. Исследование гидродинамики потока

Рассмотрим задачу о движении смазочного слоя вязкой несжимаемой жидкости между вращающимся

верхним основанием с заданной угловой скоростью ω_1 и неподвижным нижним основанием, в которое поступает поток смазки через отверстие ($0 \leq r \leq R_0$) с постоянной скоростью V и вытекает через открытую боковую поверхность (рис. 1).

Для исследования гидродинамики поставленной задачи в предположении ламинарности течения воспользуемся полной системой уравнений Навье-Стокса, которая в цилиндрической системе координат r, φ, z может быть записана в виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = -\Omega, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (V_z \Omega) + \frac{\partial}{\partial r} (V_r \Omega) = \\ = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Omega}{r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial (V_\varphi)^2}{\partial z}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (V_z V_\varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r V_\varphi) + \frac{V_r V_\varphi}{r} = \\ = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} \right) - \frac{V_\varphi}{r^2} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 18-01-00762)

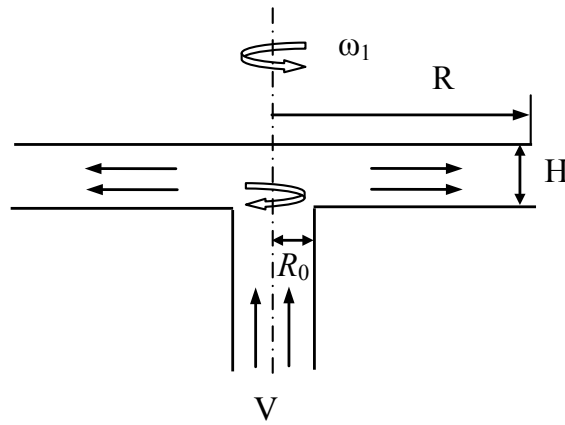


Рис. 1. Схема течения

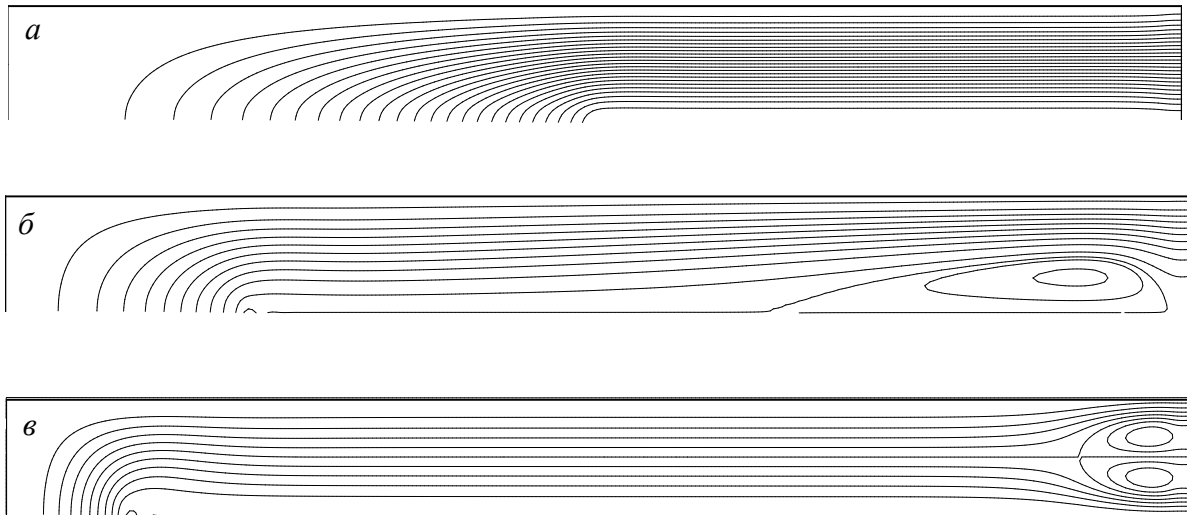


Рис. 2. Линии тока при $h = 0.1, V_0 = 0.1, \beta = 2, Re = 10, r_0 = 5$ (а),
 $Re = 50, r_0 = 2$ (б), $Re = 100, r_0 = 1$ (в)

$$V_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad V_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \Omega = \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial r}. \quad (4)$$

Здесь Ψ — функция тока, Ω — завихренность, V_z, V_r, V_φ осевая, радиальная и азимутальная составляющие скорости. Все переменные являются безразмерными величинами. Линейные размеры отнесены к толщине смазочного слоя H , а скорости — к значению $W = \omega_1 R$. Гидродинамика потока полностью определяется значениями следующих параметров: числа Рейнольдса $Re = WH/\nu$, где ν — кинематическая вязкость и коэффициентов $h = H/R, V_0 = V/W, \beta = R/R_0, r_0 = R_0/H$.

Течение рассматривается в цилиндрической области $D (0 \leq z \leq 1, 0 \leq r \leq r_k), r_k = R/H$. Граничные условия для системы (1)-(4), численный метод решения поставленной задачи и сравнение полученных решений с результатами расчетов по классической теории смазки представлено в [1]. Характерные картины линий тока рассматриваемой конфигурации течения изображены на рис. 2.

При малых числах Рейнольдса, например $Re = 10$ (рис. 2, а), течение характеризуется безотрывной структурой и соответствует классической теории смазки.

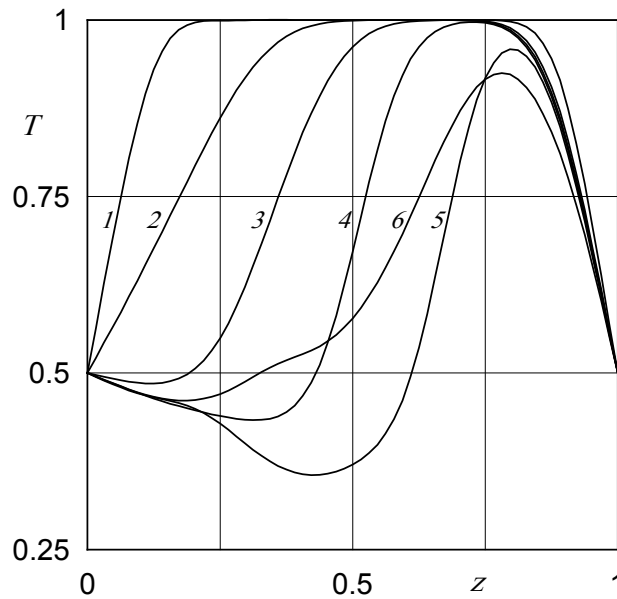


Рис. 3. Распределение температуры при $Re = 100, h = 0.1, V_0 = 0.1, \beta = 2, r_0 = 2$ в сечениях $r/R = 0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 1$ (кривые 1–6)

С увеличением числа Рейнольдса, которое может быть связано с ростом угловой скорости вращения ω_1 или с уменьшением толщины смазочного слоя H , в потоке формируются зоны возвратных течений (рис. 2, б). Этот эффект связан с явлением распада вихря [2–4]. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса происходит разделение потока на две симметричные части также с образованием зон рециркуляции (рис. 2, в).

2. Перенос тепла в смазочном слое

Перейдем к исследованию распределения температуры в смазочном слое. Для этого воспользуемся решением гидродинамической задачи в рамках уравнений Навье-Стокса, полученным в предыдущем разделе полем течений и распределением компонент скоростей. Баланс тепла в рассматриваемой области течения может быть описан в безразмерном виде уравнением переноса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(V_z T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r V_r T) = \\ = \frac{1}{Re Pr} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где T — температура, $Pr = \nu/a$ — число Прандтля, a — коэффициент температуропроводности.

В качестве граничных условий для уравнения (5) используем выражения:

$$z = 0: T = 1, \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad T = T_1, \quad r_0 \leq r \leq 1, \quad (6)$$

$$z = 1: T = T_2, \quad 0 \leq r \leq 1, \quad (7)$$

$$0 \leq z \leq 1: \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad r = r_k. \quad (8)$$

В этом случае температура на входе и твердых поверхностях соответствует заданным начальным значениям, а в выходном сечении задаются мягкие граничные условия.

Решение краевой задачи (5)-(8) осуществлялось конечно-разностным методом установления. На рис. 3 представлены зависимости распределения температуры для течения, изображенного на рис. 2, б. Основной эффект, отмеченный в исследовании, заключается в понижении температуры смазочного слоя в рециркуляционных зонах (кривые 3–6). Данный характер распределения температуры имеет аналогию с эффектом Ранка-Хилша [5], используемым для температурного разделения потока в поле действия центробежных сил.

Заключение

Представленная методика исследования позволяет проводить численное моделирование процессов теплопереноса в смазочном слое при умеренных чис-

лах Рейнольдса, в частности, при наличии в потоке зон возвратных течений. Распределение температуры при движении смазки характеризуется значительной неод-

нородностью. Увеличение вращения потока способствует охлаждению приосевых слоев течения и нагреванию периферийных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметов В. К. Границы применимости модели Стокса в расчетах опор скольжения // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2019. № 10. С. 63–65.
2. Lucca-Negro O., O'Doherty T. Vortex breakdown: a review. *Progr. in Energy and Comb. Sci.* 2001. V. 27. P. 431–481.
3. Dennis D. J. C., Seraudie C., Poole R. J. Controlling vortex breakdown in swirling pipe flows: Experiments and simulations. *Physics of Fluids*. 2014. V. 26, 053602.
4. Ахметов В.К., Шкадов В.Я. Устойчивость свободных и ограниченных закрученных течений с зонами рециркуляции // Инженерная физика. 2008. № 6. С. 6–13.
5. Пиралишвили Ш.А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: Энергомаш, 2000. 414 с.

© Ахметов Вадим Каюмович (vadim.akhmetov@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Московский государственный строительный университет