

03

Влияние тепловыделения в микропрослойке жидкости при измерении ее вязкости

© Б.А. Алтоиз, Н.В. Савин, Е.А. Шатагина

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова,
65082 Одесса, Украина
e-mail: altba@mail.ru

(Поступило в Редакцию 26 июня 2013 г.)

Методом конечных элементов решена краевая задача теплопроводности для тепловой модели измерительного узла сложной конфигурации оригинального ротационного вискозиметра, позволяющего изучать реологические особенности микронных прослоек жидкости. Полученное распределение температурного поля в узле позволяет учитывать тепловыделение при внутреннем трении в нем. Проанализированы результаты ранее проведенных экспериментов с микронными гетерофазными прослойками.

Введение

Экспериментальные исследования реологии приповерхностных эпитропно-жидкокристаллических (ЭЖК) слоев [1] и установление их свойств важны в теоретическом [2,3] и прикладном [4] аспектах. Эти слои хотя и тонкие (на металле — до $4\ \mu\text{m}$), но играют важную роль в ряде технологических процессов и явлений. В частности, в триадах трения микронные гетерофазные содержащие ЭЖК прослойки смазки определяют характер граничного трения [5].

Поэтому актуально установление влияния на структурно чувствительный коэффициент вязкости и таких прослоек, и ЭЖК-слоя (иной, чем у изотропной — „объемной“ жидкости), сдвиговой деформации и температуры. Анализ соответствующих реологических зависимостей позволяет определить существенные для технических приложений свойства прослоек и такие параметры ЭЖК-слоя, как его равновесную толщину, „гидродинамическую прочность“, тип структуры, ее однородность и др. [6,7]. Надежная информация об изменении ЭЖК-свойств с температурой и скоростью сдвиговой деформации позволяет решить вопрос о природе и механизме организации этого состояния.

Традиционные вискозиметры и методики позволяют исследовать прослойки лишь сравнительно „толстые“, на вязкости которых не отражается малая доля содержания в них ЭЖК-слоев. В изучении последних реологическим методом хорошо зарекомендовал себя оригинальный ротационный вискозиметр [8,9]. Отличительной конструктивной особенностью этого прибора является возможность исследования куэзовского течения в тонких ($d = 1\text{--}10\ \mu\text{m}$) жидких прослойках, соизмеримых по толщине с толщиной ЭЖК-слоев в них. Из полученных этим вискозиметром изотермических реологических кривых течения таких прослоек — зависимостей их вязкости $\mu(\dot{\gamma})$ от скорости деформации $\dot{\gamma}$ — и установлен [2–8,10] ряд параметров ЭЖК-слоев, как моторных масел, так и их основных компонент — алифатических углеводородов.

Одной из проблем при получении изотермических реокривых является контроль температуры (и ее неизменности) прослойки исследуемой жидкости в опытах при различных скоростях сдвиговой деформации $\dot{\gamma}$. Дело в том, что при внутреннем трении в этой прослойке выделяется тепло $Q = \mu\dot{\gamma}^2$ (W/m^3), приводящее к повышению ее температуры T^* и ее отличию ($\Delta T^* = T^* - T_{\text{sens}}$) от показания T_{sens} температурного датчика, расположенного в конструкции прибора (см. ниже) не в самой прослойке. Как будет показано, такое повышение T^* и величина ΔT^* в экспериментах [2–8,10] были незначительными в пределах погрешности датчика.

Однако в предварительных опытах с „толстыми“ $d > 10\ \mu\text{m}$ прослойками было замечено, что даже при средней из диапазона применяемых в [2–8,10] скоростей $\dot{\gamma} \approx 9000$ за время опыта ($\sim 10\ \text{min}$) измерительный узел прибора и соответственно исследуемая прослойка нагреваются ($\sim 1.5\ \text{K}$). Это свидетельствует и о существенном изменении при этом профиля температуры по узлу, и о более значительном повышении и T^* и ΔT^* , которые могут отразиться на интерпретации результатов. Предположительно в подобных опытах сказывается и тепловыделение Q_{gr} в пленке смазки подшипника вращающегося цилиндра пары — обстоятельство, которое ранее не рассматривалось, но которое также должно учитываться при планировании эксперимента и анализе его результатов. Это определяет необходимость рассмотрения влияния внутреннего трения в узле на профиль температур в нем и величину ΔT^* .

1. Измерительный узел вискозиметра и тепловыделение в нем

Контроль температуры исследуемой прослойки в узле (рис. 1) осуществляется чувствительным ($\Delta T_{\text{sens}} = \pm 0.03\ \text{K}$) распределенным датчиком (медная проволока $R_i \approx 100\ \Omega$, намотанная на слюдяную пластину высотой $h = 30\ \text{mm}$ и свернутую в трубку $\varnothing = 30\ \text{mm}$). Датчик размещен в цилиндрическом коаксиальном за-

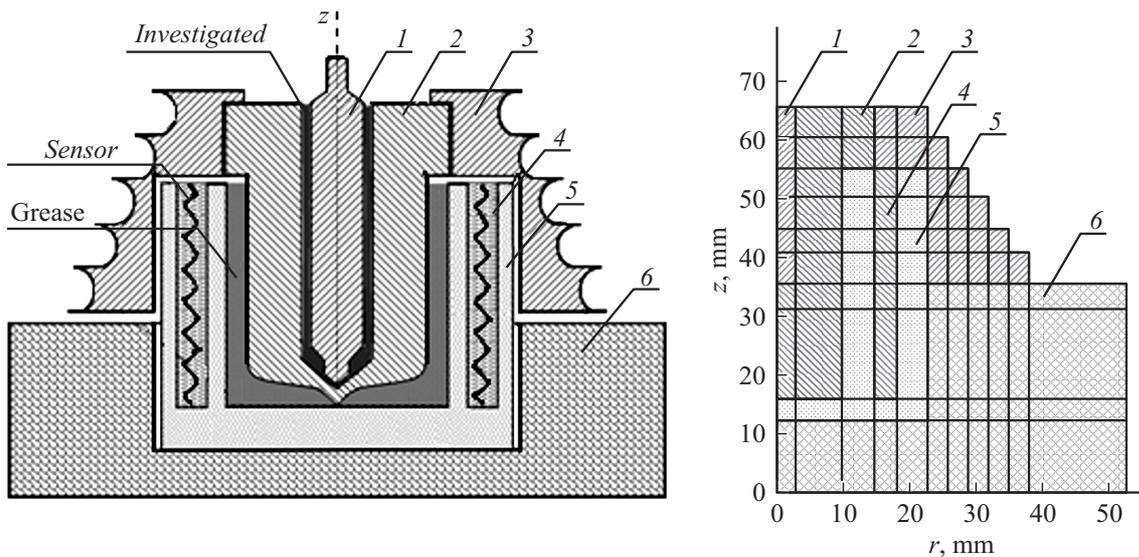


Рис. 1. Измерительный узел вискозиметра и его конечноэлементная расчетная модель: 1 — внутренний цилиндр пары, 2 — вращающийся внешний цилиндр пары, запрессованный в приводной шкив, 3, 4 — кольцевой зазор с теплоносителем для датчика, выполненный в обойме 5 подшипника цилиндра, 2, 6 — основание.

зоре (3 mm) латунной обоймы 5 подшипника и залит трансформаторным маслом. Таким образом, в конструкции [9,10] измерительного узла прибора датчик от объекта измерения — прослойки жидкости ($r = 3$ mm) в зазоре d ротационной пары — отделен пленкой смазки, стенкой (3 mm) зазора обоймы 5 и телом вращающегося стального внешнего цилиндра 2 пары. От наружной поверхности узла (с температурой T_{surf}) датчик экранирован внешней стенкой обоймы 5, приводным шкивом 3 из дюралюминия и теплоизолирующей оболочкой — основанием 6 (из пенополистирола с малым коэффициентом теплопроводности λ).

Такое размещение датчика и обусловленное тепловыделением Q изменение температуры по узлу от T^* до T_{surf} приводит к тому, что регистрируемая датчиком температура T_{sens} отличается от искомой в прослойке на некоторую величину ΔT^* . Заметим, что в силу пространственного распределения $T(r, z)$ величина T_{sens} представляет интегральную температуру $\langle T_{\text{sens}}(r, z) \rangle$ по области ($\Delta r = 3$ mm, $\Delta z = 35$ mm) датчика. Пространственная неоднородность $T^*(z)$ (неоднородностью по r можно пренебречь, так как $\Delta r < 50 \mu\text{m}$) имеет место и по измеряемой прослойке ($\Delta z = 45$ mm), но в меньшей степени благодаря ее положению в ротационной паре. Такое систематическое (и зависящее от d , μ и γ), но не учитываемое отличие $\Delta T^* = \langle T_{\text{sens}}(r, z) \rangle - \langle T^*(z) \rangle$ может существенно повлиять на представление об истинной температуре прослойки и исказить степень влияния собственно течения (и температуры) на структуру ЭЖК-слоев и измеряемую вязкость прослойки.

Кроме тепла Q , поступающего из измеряемой прослойки, на профиль температуры $T(r, z)$ и, таким образом, на показания T_{sens} влияет и отмеченное выше

тепловыделение Q_{gr} в пленке смазки ($D = 110 \mu\text{m}$, масло SAE 15W40, $\mu = 0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) подшипника 5 (рис. 1), расположенного вблизи термометра. В этой кольцевой ($R = 11$ mm) пленке смазки скорость деформации γ_{gr} меньше, чем γ в измеряемой прослойке: $\gamma_{\text{gr}} = (R/r)(d/D)\gamma$, и поэтому удельные (W/m^3) мощности в них сильно различаются. Соотношение между Q и Q_{gr} при неизменной скорости деформации в измеряемой прослойке зависит от ее толщины. Так, в измеряемой прослойке (с SAE 15W40) толщиной $d = 1 \mu\text{m}$ при $\gamma \approx 9 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ выделяется $Q = 20 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$. При этом в пленке смазки скорость деформации составляет всего $\gamma_{\text{gr}} = 300 \text{ s}^{-1}$, и потому удельное тепловыделение на 3 порядка меньше: $Q_{\text{gr}} = 22 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$. При той же $\gamma \approx 9 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ в измеряемой прослойке, но толщиной $d = 10.5 \mu\text{m}$ скорость деформации в пленке смазки $\gamma_{\text{gr}} = 3.2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, а выделяемая в ней теплота уже лишь на порядок меньше: $Q_{\text{gr}} = 2.5 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$. Но при этом поверхностные плотности тепловыделения (W/m^2) в них (по цилиндрическим площадям прослойки и пленки: $q = dQ$ и $q_{\text{gr}} = DQ_{\text{gr}}$), которые собственно и определяют как профиль температур, так и искомую ΔT^* , в первом случае отличаются на порядок ($q/q_{\text{gr}} \geq 8$), а во втором тепловыделение в прослойке ($q = 210 \text{ W/m}^2$) несколько меньше, чем в смазке ($q_{\text{gr}} = 272 \text{ W/m}^2$).

Такие значительные q и q_{gr} и вызывают нагрев и сказываются на величине поправки ΔT^* , которую необходимо знать для методического обеспечения как измерений, так и корректного анализа изотермических реокривых течения. Величина ΔT^* определяется из пространственного распределения температуры в узле, установившегося в процессе его работы. Такое стационарное распределение $T(r, z)$ может быть получено из решения краевой задачи теплопроводности.

При решении таких задач в системах со сложной конфигурацией элементов технические конструкции заменяются расчетными моделями, которые с определенными допущениями отражают интересующие физические явления в реальных устройствах. В качестве основных моделей (позволяющих получить математическое решение задачи в аналитическом виде) тел используются полуграниченное тело, неограниченная пластина, сплошной цилиндр, шар, полый цилиндр и др. [11,12].

Однако сложная геометрическая форма поверхности и неоднородное распределение материалов и их теплофизических характеристик по объему описанного узла вискозиметра не позволяют использовать эти простые модели. Принципиальную трудность представляет наличие своеобразных теплопроводных мостиков из стали, латуни и алюминия, через которые тепловые потоки обходят зону размещения датчика и проникают в него с двух сторон. Эти сложности могут быть учтены с помощью численных методов, таких как метод сеток, метод конечных разностей, метод конечных элементов.

Так, в работе [13] для установления температурных полей в узле ротационной пары вискозиметра применялся метод конечных разностей, но в связи с особенностью геометрии системы (область сверхтонкой прослойки жидкости размером на несколько порядков меньше остальных) решение в широком диапазоне режимов работы узла с удовлетворительной точностью не было получено. В [14] рассмотрено обобщение задачи Н.П. Петрова о движении смазки в симметричном слое произвольной толщины между вращающимися цилиндрами для случая учета теплообмена и температурной зависимости вязкости. Частное решение этой задачи (при малом зазоре между цилиндрами) позволило лишь оценить, что среднее отклонение от экспериментальных значений вязкости составляет 3–4% в интервале температур 15–65°C. Эти и иные методы не позволяют корректно учесть разогрев исследуемой и смазочной прослоек вследствие диссипации энергии в них и получить значение поправки ΔT^* с требуемой точностью для сложной конфигурации элементов узла.

2. Краевая задача и моделирование теплового поля

Для установления пространственного распределения $T(r, z)$ по узлу в зависимости от Q и Q_{gr} , оценки влияния этих источников на $T(r, z)$, локальные распределения температуры по прослойке $T^*(z)$ и датчику $T_{sens}(z)$, и расчета их интегральных значений $\langle T_{sens}(r, z) \rangle$, $\langle T^*(z) \rangle$ была поставлена и решена следующая краевая задача теплопроводности.

В двух областях (рис. 1) модельного узла (из элементов с различными геометрией и теплофизическими свойствами) в начальный момент времени начали действовать распределенные источники тепла известной постоянной мощности. На внешней поверхности узла

заданы граничные условия III рода. Необходимо рассчитать установившееся с течением времени стационарное пространственное распределение температуры $T(r, z)$ по узлу.

Решение задачи проведено методом конечных элементов [15] разработанным программным комплексом, математическая модель которого основана на базе четырехугольных конечных элементов с квадратичной аппроксимацией искомой функции $T(r, z)$ в пределах конечного элемента. Процессы тепловыделения в сверхтонких прослойках учитывались прямым интегрированием распределения поверхностной плотности тепловыделения вдоль цилиндрической границы соприкосновения двух соседних элементов.

На рис. 1 рядом с изображением разреза измерительного узла вискозиметра представлена с учетом осевой симметрии сетка разбиения расчетной области на прямоугольные конечные элементы. Квадратичная аппроксимация искомой функции $T(r, z)$ в пределах каждого прямоугольника осуществлялась координатными функциями на восьми узлах (рис. 2).

В относительных координатах (ξ, η) эти функции имеют вид

$$N_i(\xi, \eta) = 0.25(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(\xi_i \xi + \eta_i \eta - 1)$$

— для узлов, расположенных в угловых точках ($i = 1, 3, 5, 7$), и

$$N_i(\xi, \eta) = 0.5(1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta);$$

$$N_i(\xi, \eta) = 0.5(1 - \eta^2)(1 + \xi_i \xi)$$

— для узлов, расположенных на серединах горизонтальных сторон ($i = 2, 6$) и на серединах вертикальных сторон ($i = 4, 8$) соответственно.

На рис. 2 показаны графики распределения координатных функций $N_1(\xi, \eta)$ и $N_2(\xi, \eta)$ в пределах четырехугольного конечного элемента. Эти графики для остальных нечетных узлов аналогичны распределению функции $N_1(\xi, \eta)$, а для четных узлов — функции $N_2(\xi, \eta)$. Координатные функции осуществляют отображение квадрата в относительных координатах (рис. 2) на (в общем случае криволинейный) четырехугольник в абсолютных координатах. Отображение осуществлялось по формулам

$$r = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) r_i, \quad z = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) z_i,$$

где r_i, z_i — координаты узлов конечного элемента.

С помощью координатных функций уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\lambda_r r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{d}{dz} \left(\lambda_z \frac{dT}{dz} \right) = -Q(r, z) + \rho c \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

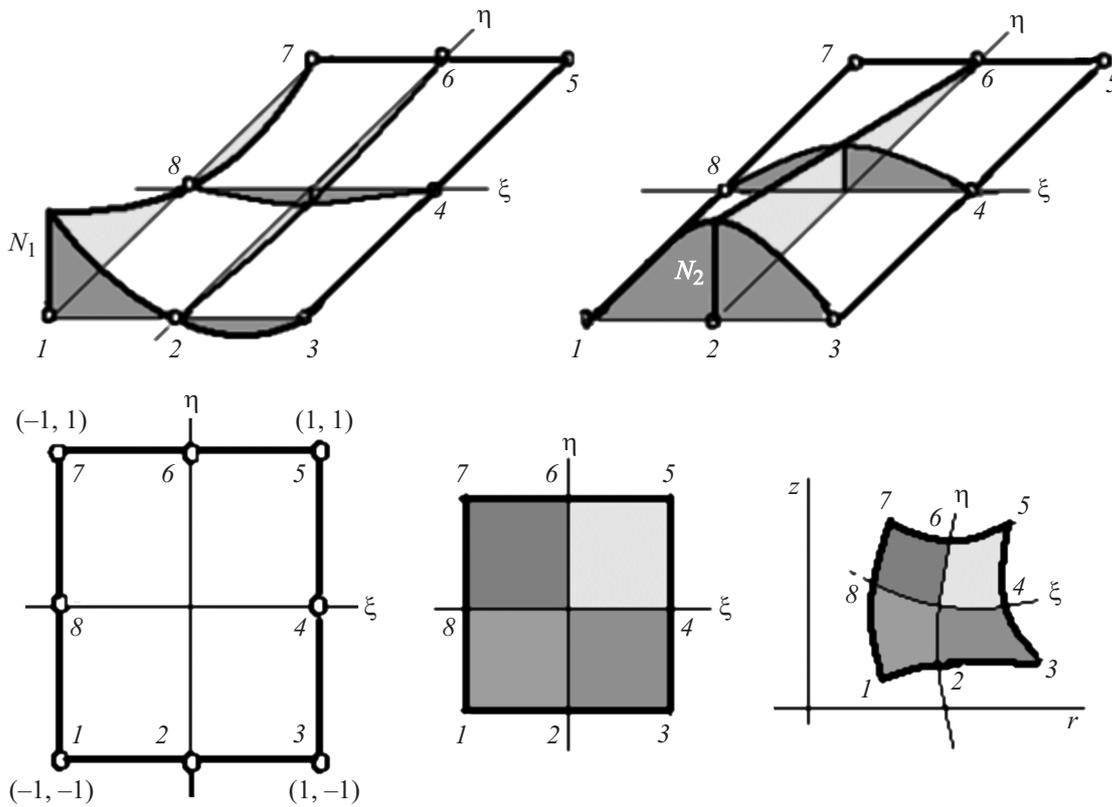


Рис. 2. Координатные функции четырехугольного элемента.

относительно функции $T(r, z)$ преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений относительно значений этой функции в узлах аппроксимации

$$[K + H][T] = [F] + [C] \left[\frac{dT}{dt} \right]. \quad (2)$$

Компоненты матриц в системе уравнений (2) вычислялись через координатные функции — для матриц коэффициентов (k_{ij} ; h_{ij}), свободных членов (f_{ij}) и теплоемкостей (c_{ij}) соответственно:

$$k_{ij} = \lambda_r \int_z \int_r \frac{dN_i}{dr} \frac{dN_j}{dr} r dr dz + \lambda_z \int_z \int_r \frac{dN_i}{dz} \frac{dN_j}{dz} r dr dz,$$

$$h_{ij} = \int_r N_i N_j \alpha_z(r) r dr + \int_z N_i N_j \alpha_r(z) r dz,$$

$$f_i = - \int_z \int_r N_i N_j q_i(r, z) r dr dz,$$

$$c_{ij} = \rho c \int_z \int_r N_i N_j r dr dz.$$

При решении нестационарной задачи путем замены

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta t} \quad \text{и} \quad T = \frac{T_{j+1} + T_j}{2},$$

реализована итерационная схема Кранка–Николсона

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{2} [K + H] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right] [T_{j+1}] \\ & = [F] - \left[\frac{1}{2} [K + H] - \frac{1}{\Delta t} [C] \right] [T_j]. \end{aligned} \quad (3)$$

Из решения системы линейных алгебраических уравнений (2) определяется температура в узлах сетки конечных элементов и с помощью координатных функций вычисляются значения температуры в заданных точках исследуемой расчетной модели

$$T(r, z) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) T_i.$$

В качестве исходных данных в расчетах задавались геометрические размеры элементов прямоугольной сетки (рис. 1), табличные данные по плотности, теплоемкости и теплопроводности материалов в пределах каждого прямоугольного элемента, коэффициент конвекции α на поверхности измерительного узла вискозиметра и поверхностные (W/m^2) мощности тепловыделения в прослойке исследуемой жидкости q и пленки смазки q_{gr} .

Осевая симметрия конструкции учитывалась заданием нулевых краевых условий Неймана вдоль оси z . Такие же краевые условия задавались и на нижней торцевой поверхности теплоизолирующей подложки из пенопласта.

Коэффициент конвекции α определялся экспериментально — из сопоставления экспериментальных и расчетных кривых остывания [16] узла вискозиметра в режиме его работы (вращении шкива 3) и в неподвижном его состоянии. Практическое совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей определения α позволяет считать полученные (с использованием его величины $\alpha = 9.74 \text{ W/m}^2\text{K}$ в рабочем режиме вискозиметра) искомые профили температурных полей достаточно надежными.

3. Профиль температур в узле и обсуждение результатов

Такие радиальные (для середины прослойки и датчика, $z = 35 \text{ mm}$) рассчитанные ($\alpha = 9.74 \text{ W/m}^2\text{K}$, $q = q_{gr} = 300 \text{ W/m}^2$) профили $\Delta T^*(r, 35) = T(r, 35) - T(25, 35)$ показаны на рис. 3. Здесь $T(25, 35)$ — локальная температура T_{surf} поверхности шкива ($r = 25 \text{ mm}$, $z = 35 \text{ mm}$) при работе узла. Профиль $q + q_{gr}$ рассчитан с учетом тепловыделения в пленке смазки (SAE 15W40), а профиль q — без его учета. Здесь же выделены области (Δr) измеряемой прослойки (1) и датчика (2).

Как видно из рис. 3, температура в средней по высоте зоне датчика (без учета тепла от пленки смазки q_{gr}) меньше соответствующей температуры прослойки на $\Delta T^* \approx 0.03 \text{ K}$. Учет q_{gr} приводит к повышению температуры как прослойки ($\sim 0.03 \text{ K}$), так и зоны датчика ($\sim 0.01 \text{ K}$), при этом величины тех же локальных температур отличаются уже на $\Delta T^* \approx 0.05 \text{ K}$.

Оценка неоднородностей профиля температуры $T^*(z)$ по измеряемой прослойке и по области датчика $T_{sens}(r, z)$ и определение их интегральных $\langle T \rangle$ также проведена по результатам расчета в узлах сетки конечных элементов при стационарном рабочем режиме изотермических измерений. Рассчитанные (при $q = 300 \text{ W/m}^2$) графики распределения температуры $T^*(3, z)$ по прослойке ($r = 3 \text{ mm}$) исследуемой жидкости (линия 1) и по

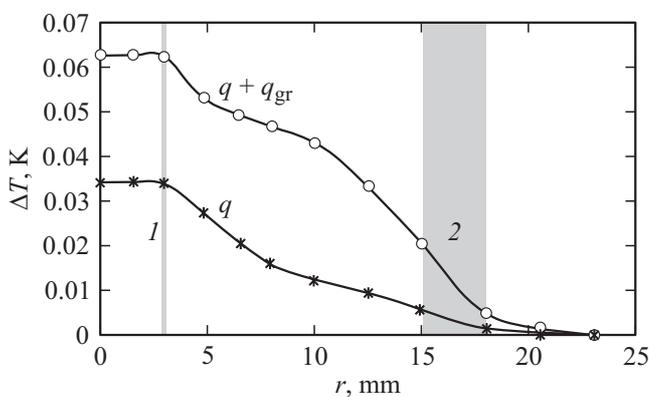


Рис. 3. Радиальные ($z = 35 \text{ mm}$) распределения температуры в узле $\Delta T^*(r, z) = T(r, z) - T(25, 35)$. $T(25, 35)$ — локальная температура поверхности ($r = 25 \text{ mm}$, $z = 35 \text{ mm}$) шкива.

центральному ($r = 16 \text{ mm}$) сечению области $T_{sens}(16, z)$ датчика (линия 2) представлены на рис. 4. Как из него следует, распределение температуры по высоте исследуемой прослойки жидкости, как и предполагалось, практически однородно. Имеют место лишь незначительные ($\sim 0.005 \text{ K}$) изменения ее температуры в области контакта цилиндров с окружающей средой, и в нижней — где цилиндры соприкасаются с латунной обоймой. Столь малая неоднородность не отражается на изменении вязкости по ее высоте. По области датчика за счет рассеяния тепла q в нижней части обоймы 5 (рис. 1) неоднородность выше ($\sim 0.03 \text{ K}$), однако и она в пределах погрешности измерений температуры.

При действии второго источника q_{gr} эта неоднородность еще меньше. Это позволяет, пренебрегая неоднородностью температурного поля по датчику $T_{sens}(r, z)$ и, тем более — по прослойке, для искомой поправки $\Delta T^* = T_{sens} - T^*$ к показанию датчика (его интегральной $T_{sens} = \langle T_{sens}(r, z) \rangle$), использовать расчетное значение ее температуры для середины ($z = 40$) прослойки $T^* = T^*(3, 40)$.

Основной величиной, определяющей поправку ΔT^* в рассматриваемом узле, являются мощности источников q и q_{gr} . Диапазон изменения их величин (зависящих от вязкости и в основном от скорости деформации) весьма большой (от 0.015 до 1000 W/m^2). В этом интервале расчеты показали, что $\Delta T^*(q) = 1.091 \cdot 10^{-4} q$ — при действии q , и $\Delta T^*(q_{gr}) = 1.0 \cdot 10^{-4} q_{gr}$, если действует лишь q_{gr} . Поэтому при q , q_{gr} до 150 W/m^2 ΔT^* порядка погрешности датчика и меньше. При q и $q_{gr} \approx 1000 \text{ W/m}^2$, поскольку эти источники действуют одновременно, узел за время 10 min нагревается на $\sim 6 \text{ K}$, а величина ΔT^* будет составлять 0.21 K, т.е. почти на порядок выше погрешности датчика, и с которой уже надо считаться при анализе результатов эксперимента. Удобными для планирования последнего и обработки его результатов (с точки зрения необходимости устройства принудительного теплообмена для предотвращения столь высокого нагрева и учета ΔT^* при анализе полученных реокривых) являются зависимости этой поправки $\Delta T^*(\gamma)$, обусловленной тепловыделением $q + q_{gr}$, от скорости деформации γ в измеряемой прослойке заданной толщины.

Такие расчеты $\Delta T^*(\gamma)$ проведены и приведены (на рис. 5) для ряда опытов, описанных в [2,4-8], максимальный нагрев узла в которых не превышал 0.5 K. На рис. 5 линии 1, 3, 5 и 7 — в прослойках толщиной (μm) 10.5, 6.5, 4.5 и 1.5 — SAE 15W40 ($\mu_x = 0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$); 4, 6 — 6.5 и 4.5 — вазелиновое масло ($\mu_x = 0.025 \text{ Pa} \cdot \text{s}$); 2 — 10.5 — гексадекан ($\mu_x = 0.004 \text{ Pa} \cdot \text{s}$). Из рис. 5 видно, что величина ΔT^* (при фиксированной γ) возрастает с толщиной прослойки и зависит от вязкости измеряемой жидкости. Так, в прослойках $d = 10.5 \mu\text{m}$ зависимости $\Delta T^*(\gamma)$ 1 и 2 сравнимы, хотя вязкость SAE 15W40 почти на 2 порядка выше вязкости гексадекана. На графиках зависимостей $\Delta T^*(\gamma)$ отмечены максимальные скорости деформации γ_{max} , достигаемые в этих опытах, и соответ-

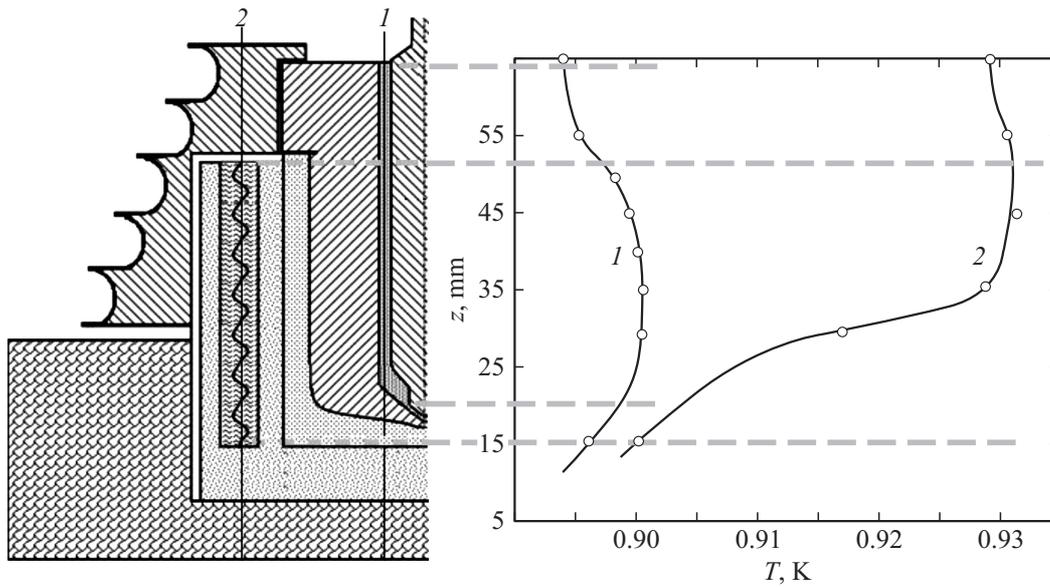


Рис. 4. Распределение температуры по прослойке $T^*(z, z)$ 1 — исследуемой жидкости и 2 — по датчику $T_{\text{sens}}(16, z)$. $q = 300 \text{ W/m}^2$.

ственно, расчетные для них необходимые максимальные поправки ΔT_{max}^* . Видно, что они были меньше погрешности ($\Delta T_{\text{sens}} = \pm 0.03 \text{ K}$, штриховая линия на рис. 5) датчика температуры. Тепловыделение q в прослойке пропорционально ее толщине и поэтому пропорционально последней (при неизменной скорости деформации) возрастает и величина поправки. Объясняется это тем, что с ростом толщины измеряемой прослойки уменьшается и различие в скоростях γ и γ_{gr} . Поэтому в опытах с толщинами $d > 4 \mu\text{m}$ на величине $\Delta T^*(\gamma)$ уже существенно сказывается и тепловыделение q_{gr} в пленке смазки. При этом играет роль и ее вязкость.

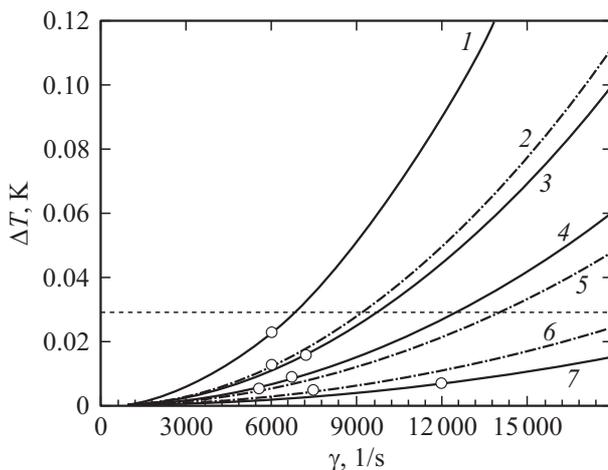


Рис. 5. Зависимости поправок $\Delta T^*(\gamma)$ от скорости деформации. В прослойках $d (\mu\text{m})$ измеряемые жидкости: 1, 3, 5, 7 — 10.5, 6.5, 4.5, 1.5 — SAE 15W40; 2 — 10.5 — гексадекан; 4, 6 — 6.5, 4.5 — вазелиновое масло. Максимальные γ_{max} и их значения в опытах [2,4-8]. Штриховая линия — погрешность датчика температуры.

Так, из расчетов следует, что в измерении вязкости прослойки ($d = 10.5 \mu\text{m}$) SAE 15W40 при $\gamma \sim 9 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ (с тем же маслом в подшипнике, линия 1 рис. 5) общая мощность тепловыделения будет составлять $N \approx 1.3 \text{ W}$. Эта мощность приведет не только к поправке $\Delta T^* \approx 0.05 \text{ K}$ (рис. 5), но и к повышению температуры узла за время (10 min) на $\sim 1.5 \text{ K}$, что согласуется с замеченным в предварительных опытах (см. выше) результатом. Такая величина ΔT^* и тем более дополнительный разогрев узла (и прослойки измеряемой жидкости) являются существенными для исследуемых ЭЖК-слоев со структурой, чувствительной к температуре, и для масел с их значительной зависимостью вязкости от температуры. Так, в частности, для моторных масел повышение температуры в диапазоне эксплуатационных значений ($T = 243\text{--}423 \text{ K}$) приводит к уменьшению вязкости в 1000 раз [17]. Если при тех же условиях опыта: в прослойке ($d = 10.5 \mu\text{m}$) с SAE 15W40 и скоростью в ней $\gamma \approx 9 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ в качестве смазки использовать вазелиновое масло, то влияние q_{gr} будет менее значительно. Расчеты показывают, что в этом случае поправка $\Delta T^* \approx 0.03 \text{ K}$, мощность составляет $N \approx 0.4 \text{ W}$, а соответствующее ожидаемое повышение температуры узла за 10 min $\sim 0.4 \text{ K}$.

Заключение

На результатах изучения реологических характеристик микронных жидких прослоек описанным ротационным вискозиметром может сказываться тепловыделение при внутреннем трении в его измерительном узле. Степень этого влияния определяется из установившегося в узле профиля температуры, вид которого находится из

решения (методом конечных элементов) краевой задачи теплопроводности.

Разработанным программным комплексом, позволяющим определять температурные поля в объектах сложной конфигурации с действующими источниками тепловыделения, проведен соответствующий расчет для измерительного узла с учетом теплофизических свойств и геометрии его конструктивных элементов. По полученным пространственным распределениям температуры установлена величина необходимой поправки на температуру исследуемой прослойки при различных условиях работы вискозиметра (скорости деформации, вязкости и толщины прослойки жидкости). На результаты ранее проведенных экспериментов тепловыделение в узле практически не сказывается.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ № 14.В37.21.0897.

Список литературы

- [1] Алтоиз Б.А., Поповский Ю.М. Физика приповерхностных слоев жидкости. Одесса: Астропринт, 1996. 153 с.
- [2] Altoiz B.A., Aslanov S.K., Kiriyan S.V. // ZAMP. 2011. Vol. 62. N 2. P. 323–330.
- [3] Алтоиз Б.А., Кириян С.В., Шатагина Е.А., Шатагина А.А. // ИФЖ. 2012. Т. 85. Вып. 2. С. 425–429.
- [4] Алтоиз Б.А., Кириян С.В., Шатагина Е.А. // ИФЖ. 2013. Т. 86. Вып. 2. С. 371–374.
- [5] Кириян С.В., Алтоиз Б.А. // Трение и износ. 2012. Т. 33. Вып. 4. С. 265.
- [6] Алтоиз Б.А., Кириян С.В., Шатагина Е.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 37–40.
- [7] Алтоиз Б.А., Асланов С.К., Кириян С.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 8. С. 42–47.
- [8] Алтоиз Б.А., Кириян С.В. // ИФЖ. 2010. Т. 83. Вып. 3. С. 608–613.
- [9] Алтоиз Б.А., Асланов К., Бутенко А.Ф. // Физика аэродисперсных систем. 2005. Вып. 42. С. 53–65.
- [10] Кириян С.В., Алтоиз Б.А. // Тр. МФТИ. Прикладная механика, динамика жидкости и газа. 2010. Т. 2. Вып. 2. С. 101–106.
- [11] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
- [12] Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 351 с.
- [13] Кириян С.В. Структурные свойства ЭЖК слоев немезогенных жидкостей и масел на их основе вблизи поверхности металла. Автореф. канд. дис. Одесса, 2011. 167 с.
- [14] Асланов С.К. // ИФЖ. 1963. Вып. 2. С. 8–11.
- [15] Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
- [16] Шуйский В.П. Расчет электрических машин. Энергия, 1968. 732 с.
- [17] Волков А.И. Большой химический справочник. Минск: Современная школа, 2005. 603 с.