

УДК 621.01

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ-СЕЙСМОИЗОЛЯТОРОВ В УСЛОВИЯХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© Ю.Н. Дроздов¹⁾, В.А. Надеин²⁾, В.Н. Пучков¹⁾, М.В. Пучков¹⁾

¹⁾Институт машиноведения РАН, Россия, Москва

²⁾НГБ – Энергodiагностика., Россия, Москва

Аннотация. В данной работе рассмотрены вопросы выбора самосмазывающегося антифрикционного материала, предназначенного для обеспечения работоспособности маятниковых опор скольжения – сейсмоизоляторов, находящих применение в опорах ответственных зданий и сооружений (в том числе шельфовых нефтедобывающих платформ) и других объектов в сейсмопасных районах для их защиты от нагрузок, вызванных землетрясениями и другими силовыми воздействиями. Исследовано тепловое состояние опоры скольжения – сейсмоизолятора с применением современных вычислительных методов.

Ключевые слова: сейсмоизолятор, антифрикционный материал.

Многие исследователи изучали влияние высоких контактных параметров (сила трения, контактная нагрузка, скорость скольжения) на тепловое состояние узлов сухого трения и действие высоких контактных температур на трение и износ взаимодействующих пар материалов[1, 2, 3]. В данной работе предпринята попытка оценить тепловое состояние опор скольжения маятникового типа – сейсмоизоляторов, находящих применение в опорах ответственных зданий и сооружений (в том числе шельфовых нефтедобывающих платформ) и других объектов, предназначенных для снижения силовых воздействий, возникающих при землетрясениях [4, 5].

Для создания надежных и долговечных узлов трения, предназначенных для работы в экстремальных условиях, таких как подшипниковые опоры скольжения - сейсмоизоляторы, необходимо, задаваясь величиной допустимого износа, выбрать материалы и технологию их обработки, которые обеспечивали бы требуемую долговечность [4].

В то же время для правильного выбора вида антифрикционного материала важно определить тепловое состояние опоры при критических значениях параметров землетрясения. Методы оценки силовой и скоростной нагруженности опоры скольжения - сейсмоизолятора в момент землетрясения рассмотрены в работах [5, 6].

Маятниковые подшипники скольжения (ФМП) широко используются при строительстве сооружений в сейсмоактивных зонах Америки и Японии в качестве демпферов (изоляторов) для защиты поддерживаемой конструкции от повреждений, возникающих в результате землетрясений, а также от силовых воздействий иного рода (ветер, тепловые деформации, ледовые и волновые нагрузки). Реальная возможность применения маятниковых опор скольжения как эффективного средства для поглощения энергии внешних силовых воздействий появилась в последние 30-40 лет, благодаря развитию новых технологий (в особенности в связи с развитием космических исследований в СССР и США) и появлению новых триботехнических материалов[4, 5, 7, 8].

Для сейсмической изоляции находят применение маятниковые подшипники скольжения со сферической поверхностью скольжения, а также комбинированные сейсмоизолаторы, состоящие из плоского подшипника скольжения и демпферов иного типа (эластомерные, свинцово-резиновые и др.[7]), возвращающих плоскую опору скольжения в исходное состояние после прекращения сейсмического воздействия.

Маятниковые подшипники скольжения имеют поверхность скольжения (плоскую или сферическую) и шарнирный элемент, обеспечивающий полное прилегание поверхностей скольжения при относительном скольжении. Здесь рассматривается наиболее простая конструкция маятникового сейсмоизолатора – плоский подшипник скольжения. Схематическое устройство плоского маятникового подшипника скольжения показано на Рис.1.

В качестве плоской поверхности скольжения используется полированная плита, изготовленная из нержавеющей стали. Шарнирный ползун также изготовлен из нержавеющей стали. Плоская поверхность ползуна и сферическая поверхность основания покрыты тонким (0,5-3 мм) слоем подшипникового антифрикционного материала. Рабочие характеристики маятникового подшипника скольжения представлены в Таблице 1.



Рис.1. Устройство плоского маятникового подшипника - сейсмоизолатора

Таблица 1. Рабочие характеристики маятникового подшипника скольжения:

Параметр	Пределы изменения параметра
Контактное давление, Р, МПа;	30 ÷ 65
Скорость скольжения, V, м/с;	0,025÷ 0,9
Температура окружающей среды, °C	- 40°C ÷ +40 °C
Температура в зоне контакта, °C	- 40°C ÷ +450 °C
Срок службы, лет	30
Путь трения за 30 лет, м	3000

В настоящее время разработана широкая гамма антифрикционных самосмазывающихся материалов, применяемых в узлах трения скольжения - в подшипниках скольжения, цилиндрических, сферических шарнирах и др. [3, 8, 9].

Анализ рабочих характеристик исследованных материалов показывает, что имеются покрытия, обеспечивающие работоспособность подшипников скольжения и шарниров в экстремальных условиях (в температурных диапазонах от -200°C до +1000°C, при статических нагрузках до 700 МПа, при динамических нагрузках до 260 МПа, при скоростях скольжения до 7 м/с) при удовлетворении требований по износостойкости [3]. Однако очень трудно найти материал, который обладал бы всеми требуемыми оптимальными характеристиками, необходимыми для успешного

функционирования маятниковых подшипников скольжения-сейсмоизоляторов по допустимым нагрузкам, скоростям скольжения и максимально допустимым температурам, а также имел бы низкие и стабильные значения коэффициента трения.

Большинство материалов предназначены для специфических условий применения, например, при максимальных значениях одного или нескольких параметров (высокие температуры или наличие газовой среды или вакуума), либо для удовлетворения специальным требованиям (высокая несущая способность и низкое значение коэффициента трения и др.).

Наилучшие показатели имеют твердые смазочные покрытия, металлофторопластовые материалы и самосмазывающиеся покрытия на тканевой основе [3, 8-10]. Каждый из этих трех типов материалов имеет свою оптимальную область применения.

Твердые смазочные покрытия имеют высокую несущую способность, удовлетворительные теплофизические свойства, хорошую адгезию к подложке, высокие показатели износостойкости. Например покрытия на основе MoS₂ имеют хорошие трибологические характеристики при высоких температурах (до 600°... 700°C в вакууме и 450° на воздухе). Покрытия выдерживают нагрузки до 140 МПа [3]. Однако, несмотря на высокую износостойкость, ресурс этих покрытий ограничен вследствие малой их толщины (15 - 50 мкм).

Наиболее широко из самосмазывающихся материалов в подшипниках скольжения и шарнирах применяется металлофторопластовая лента (МФЛ). Этот материал имеет высокие допустимые значения контактных параметров, хорошие теплофизические свойства [9]. Такие материалы применяются при высоких статических (до 350 МПа) и динамических (до 150 МПа) нагрузках, средних скоростях скольжения, в широком диапазоне температур (-250°C ÷ +280°C). Технология производства МФЛ отработана как для цилиндрических, так и для сферических подшипников скольжения. К недостаткам этого типа материалов можно отнести: повышение коэффициента трения в зависимости от отработанного ресурса подшипника скольжения, что связано с различием структуры материала по глубине антифрикционного слоя, ограниченную величину изнашиваемого слоя (до 200 мкм), а также влияние времени выдержки под нагрузкой на величину коэффициента трения. Известно, что для подшипников, изготовленных из материала DU выдержка под нагрузкой от нескольких часов до нескольких дней приводила к возрастанию статического коэффициента трения на 50 ÷ 200 % [10].

В последнее время все большее применение находят самосмазывающиеся покрытия на основе тканей из антифрикционных волокон (ПТФЭ, графита) и высокопрочных полимиидных и углеродных волокон. Подшипники с покрытиями этого типа имеют практически самые высокие показатели: высокие допустимые значения статической (до 700 МПа) и динамической (до 260 МПа) несущей способности, приемлемые для шарирных подшипников скольжения; средние допустимые скорости скольжения; широкий диапазон рабочих температур (-130°C...÷ +250 °C). Эти покрытия имеют высокую износостойкость, могут работать в агрессивных средах, имеют низкие и устойчивые значения коэффициентов трения.

Сравнение трибологических характеристик указанных трех типов материалов приведено на Рис.2 и 3.

При сравнении свойств трех видов рассмотренных материалов становятся очевидными преимущества композиционных самосмазывающихся тканевых материалов. Материал указанного типа в 80-х годах прошлого века был разработан в СССР и в качестве покрытия для сферических шариров типа ШЛТ успешно

выдержал стендовые и натурные испытания в процессе подготовки и при запуске «Бурана»[8].

Таким образом, одним из наиболее перспективных самосмазывающихся материалов для подшипников скольжения – сейсмоизоляторов в настоящее время являются покрытия на основе тканей из волокон полимеров. В связи с тем, что несущая способность и температурная стойкость покрытия зависят, в основном, от соответствующих характеристик компонентов, входящих в состав композиционного материала, эти покрытия имеют перспективы дальнейшего совершенствования механических свойств по мере разработки новых технологий и материалов (в том числе нанотехнологий и наноматериалов).

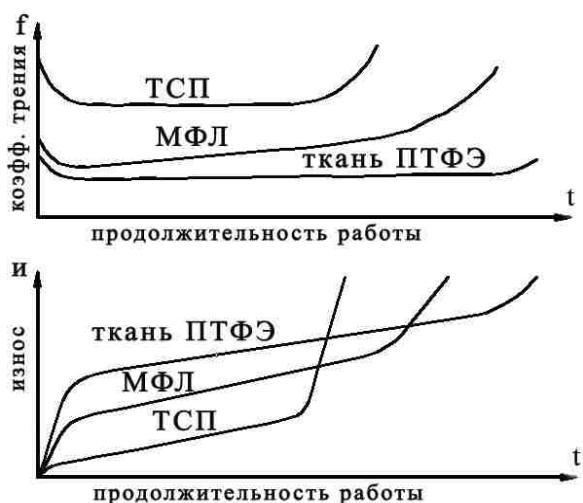


Рис.2. Характерный вид зависимостей трибологических характеристик от продолжительности работы различных типов покрытий

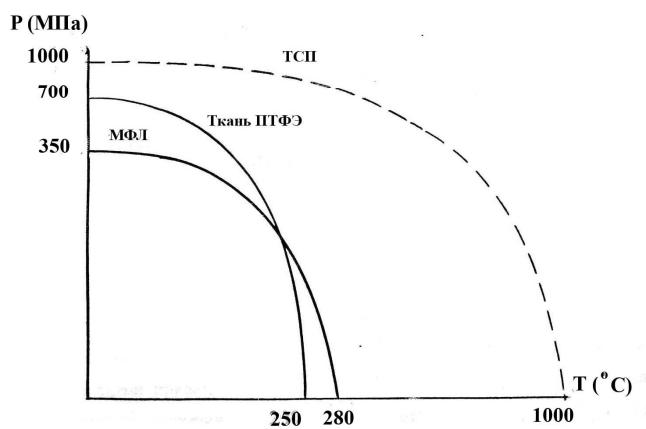


Рис.3. Зависимость несущей способности от температуры для различных типов покрытий

Изучение литературных источников (в том числе справочной литературы наиболее известных фирм, производящих подшипники скольжения: INA/FAG; Glacier; SKF и др.), а также наш собственный опыт позволили сделать техническую оценку износостойкости значительного количества триботехнических материалов – аналогов материала,

используемого в маятниковых подшипниках скольжения. В результате выполненного анализа было установлено, что износ фрикционного вкладыша при «нормальных» условиях эксплуатации, т.е. при отсутствии сейсмических воздействий, будет небольшим, что позволяет прогнозировать обеспечение заданного срока службы ФМП в указанных условиях (см. Табл.1) [4].

Однако в момент сильного землетрясения детали подшипника смещаются друг относительно друга с большой скоростью. Такое смещение вызывает сильный нагрев трещущихся поверхностей. Значительные температуры в контакте являются главной причиной повреждения и деградации полимерного материала, вызывают возрастание коэффициента трения и приводят к выходу из строя всего подшипника, который происходит в результате возникновения металлического контакта вкладыша и поверхности скольжения подшипника. Повышение температуры контакта изменяет физические свойства контактирующих материалов. При критических температурах контакта происходит деструкция органических составляющих композиционного материала, возникает катастрофический износ и разрушение подшипника.

Износ антифрикционного покрытия маятниковых подшипников – сейсмоизоляторов в условиях максимальных смещений и скоростей скольжения, будет существенно зависеть от температурного состояния контакта.

Выбор контактных параметров для самосмазывающихся опор скольжения обычно определяется величиной произведения допускаемых контактных напряжений и скоростей скольжения, а именно $[pV]$ или $[fpV]$. Удельный тепловой источник, который образуется в процессе скольжения, зависит от контактного давления; p , скорости скольжения, V , коэффициента трения скольжения, f . Указанное произведение определяет удельную мощность трения и температуру в контакте.

Температура, возникающая в контакте, является суммой температуры поверхности перед возникновением контакта трения и температурной вспышки, возникающей в контакте при трении скольжения. Коэффициент трения скольжения также зависит от температуры [1-5].

Для определения значений прироста поверхностной температуры и распределения температуры по глубине от поверхности скольжения были выполнены численные эксперименты при различных рабочих параметрах с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и результаты расчетов сопоставлялись с экспериментами.

Геометрические размеры образцов, теплофизические свойства контактирующих материалов, рабочие параметры (нагрузка, скорость скольжения, время воздействия теплового источника и кинематика движения) были такими же, что и в экспериментах с прототипами плоского подшипника скольжения – сейсмоизолятора [11]. Устройство экспериментального стенда и методика экспериментов описаны в работе [11]. При экспериментальном исследовании плоской опоры скольжения температуру контакта определяли при помощи термопары, установленной в центре контакта близко от поверхности скольжения (на глубине 1,5 мм в стальной плите). В опытах моделировали контакт реального плоского маятникового подшипника скольжения – сейсмоизолятора. В качестве антифрикционного материала использовали ненаполненный политетрафторэтилен (ПТФЭ), в качестве контртела – полированную плиту из нержавеющей стали.

Математическая модель. Скольящий контакт рассматривается как трение между двумя твердыми телами, из которых одно или оба тела двигаются с постоянной скоростью мимо имеющего форму полосы теплового источника (рис. 4). Этот источник имеет распределение теплового потока, q . Каждое тело имеет свои теплофизические константы: λ , a , γ , c - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, плотность и удельную теплоемкость, соответственно. На рис.4 схематически в самом общем виде показаны ключевые параметры, которые влияют на распределение тепла в идеальной модели

скользящего контакта. V_1 и V_2 - скорости поверхности тела 1 и поверхности тела 2, соответственно, обе скорости направлены по касательной к контакту и по нормали к длине контакта; q - распределение теплового потока; q_1 и q_2 - части распределения тепла, которое проникает через поверхность тела 1 и поверхность тела 2, соответственно; R_1 и R_2 - радиусы кривизны поверхности тела 1 и поверхности тела 2, соответственно; L и W - длина и ширина, соответственно, теплового источника.

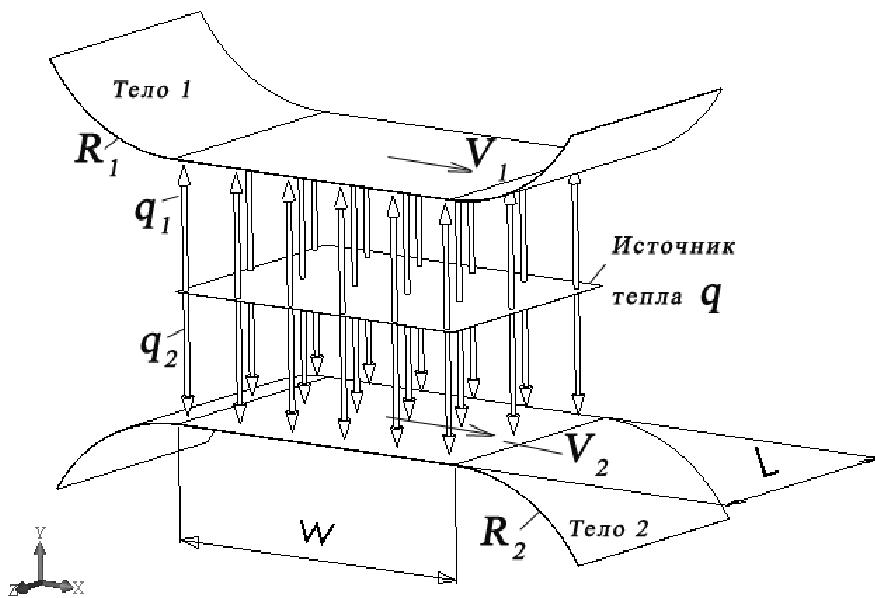


Рис. 4. Расчетная схема.

Уравнение теплопроводности (дифференциальное уравнение с частными производными) имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности для плоской задачи распространения тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

Для получения решения методом конечных элементов указанные уравнения представляются в матричной форме [12]. Чтобы получить решение задачи, необходимо задать краевые условия:

1. В зоне контакта тел отсутствует температурный скачок $t_1 = t_2$ при $z = 0, \tau > 0$, где τ - время, t_1 - температура поверхности тела 1, t_2 - температура поверхности тела 2 [3].
2. На границе контактирующих тел действует постоянный тепловой поток $q = q(x, y, z, \tau)$; потоки тепла, поступающие в каждое из контактирующих тел q_1 и q_2 , в сумме равны

удельной мощности трения, возникающей в контактной области. В общем случае в программных пакетах, использующих МКЭ (таких как, например, ANSYS), тепловой поток в первую поверхность определяется, как: $q_1 = K_P fPV$, во вторую: $q_2 = (1 - K_P) fPV$, где K_P - коэффициент разделения тепловых потоков между трущимися поверхностями.

3. Учитывая, что политетрафторэтилен относится к теплоизолирующим материалам с низкими, по сравнению с нержавеющей сталью, коэффициентами теплопроводности и температуропроводности, можно с высокой степенью точности принять $K_P = 1$.
4. Важно также учесть, что для пары трения полированная сталь — ПТФЭ фактическая площадь контакта близка к контурной [11].

Тепловой поток, выделенный при трении, в общем случае не постоянный и зависит от времени и координат. Это обусловлено зависимостями силы трения (на единицу площади) от закона движения и распределения нормальной нагрузки. Поэтому при постановке задачи используется среднее постоянное значение теплового потока, q_{cp} , так чтобы оценка роста температуры была усреднена по номинальной площади контакта.

В рассматриваемом случае, также как в эксперименте одно из тел неподвижно, а другое совершает возвратно-поступательное скольжение. Кроме того, амплитуда движущегося тела мала по сравнению с радиусом номинальной площади контакта. В связи с этим, можно принять, что в среднем движущееся тело получает постоянный тепловой поток в процессе движения. Однако это ограничение не является обязательным, так как нельзя исключать случаев, когда амплитуда движения тела будет выходить за пределы номинальной площади контакта.

Будем рассматривать кратковременные интервалы времени действия теплового потока, чтобы решение было справедливо для теплового потока, целиком идущего в трущиеся тела, без потерь на радиацию и конвекцию.

Программный комплекс ANSYS предназначен для численного решения научных и технических задач, математическая модель которых описывается дифференциальными уравнениями с частными производными. В нашем случае используются дифференциальные уравнения теплопроводности, описывающие явления теплообмена и теплопередачи.

Основой теплового анализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, полученное в соответствии с принципом сохранения энергии. При помощи ANSYS поставленная задача решается методом конечных элементов, в результате решения которой получаем поле температуры. Температурное поле затем используется для определения других тепловых параметров.

На Рис.5 показано разбиение контактирующих тел на конечные элементы.

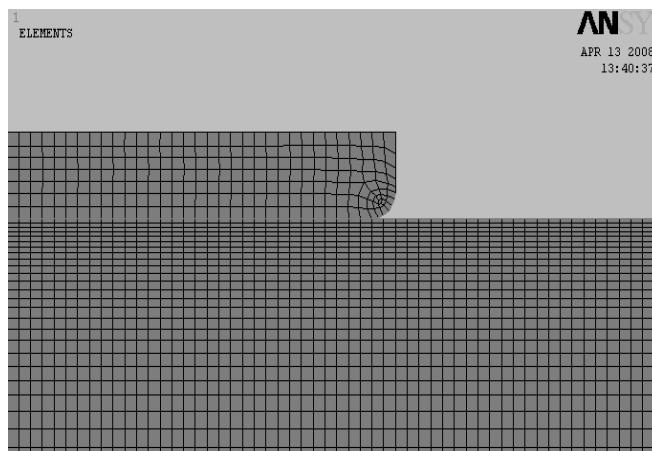


Рис. 5. Фрагмент модели.

Условия экспериментов и результаты сравнения расчетов и эксперимента представлены в Таблице 2 и Таблице 3 (приросты температуры). Отличия между экспериментальными и расчетными значениями суммарной температуры на глубине 1,5 мм от поверхности контакта составляют не более 10–25 %. На Рис. 6, 7, 8 показаны расчетные распределения температур (с учетом температуры окружающей среды) по глубине стального образца, полученные в проведенных в работе численных экспериментах. Расчетные температуры на поверхности контакта и на глубине 1,5 мм от поверхности сопоставляются с температурой, измеренной термопарой в соответствующих реальных экспериментах.

Таблица 2. Исходные данные, описывающие условия экспериментов[11].

Исходные данные								
Источник [11]	Диаметр образца (ПТФЭ), мм	Число циклов N	Путь трения, м	Коэф-т трения, среднее значение за N циклов	Длительность эксперимента, сек	Скорость, м/с	Частота качаний, 1/с	Контактное давление, МПа
эксп. 1	95	3,25	0,3302	0,098	1,62	0,2	12,57	20,7
эксп. 2	95	3,25	0,1651	0,104	1,62	0,1	12,57	20,7
эксп. 3	95	3,25	0,1651	0,036	102	0,002	0,2	20,7
эксп. 4	254	5	1	0,065	15,7	0,064	2	20,7

Таблица 3. Сравнение результатов экспериментов с расчетными результатами (прирост температуры).

Источник [11]	Темпера-тура окружающей среды, град. С	Измерен-ный прирост т-ры(на глуб. 1,5 мм), град.С	Расчет МКЭ прироста т-ры (на глуб.1,5 мм), град.С	Расчет МКЭ прироста т-ры на поверхно-сти, град С
эксп. 1	22	50	43,4	75,3
эксп. 2	21	29	22,5	39,3
эксп. 3	49	1	2,2	2,3
эксп. 4	22	51	41,0	48,4

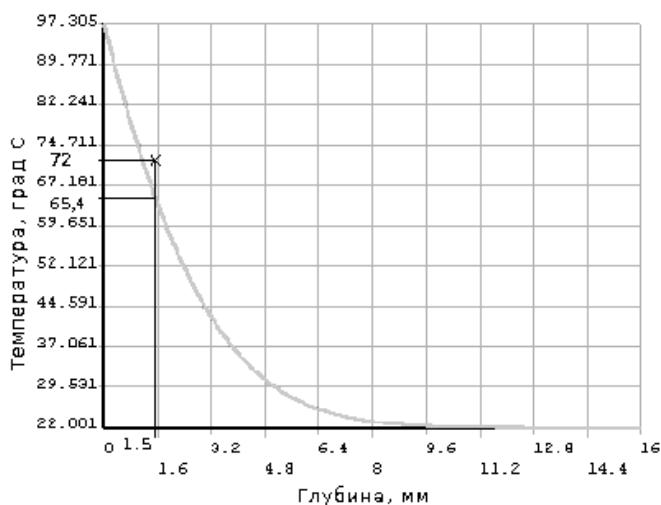


Рис. 6. Расчетное распределение суммарной температуры по глубине (х -эксперимент №1).
Вертикальной линией отмечена точка, в которой производился замер температуры.

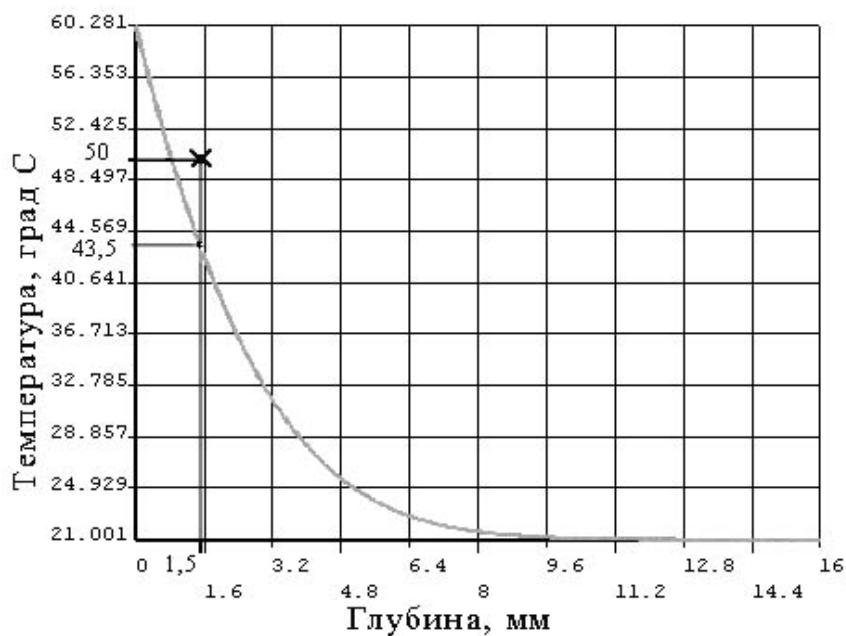


Рис. 7. Расчетное распределение суммарной температуры по глубине (х -эксперимент №2).
Вертикальной линией отмечена точка, в которой производился замер температуры.

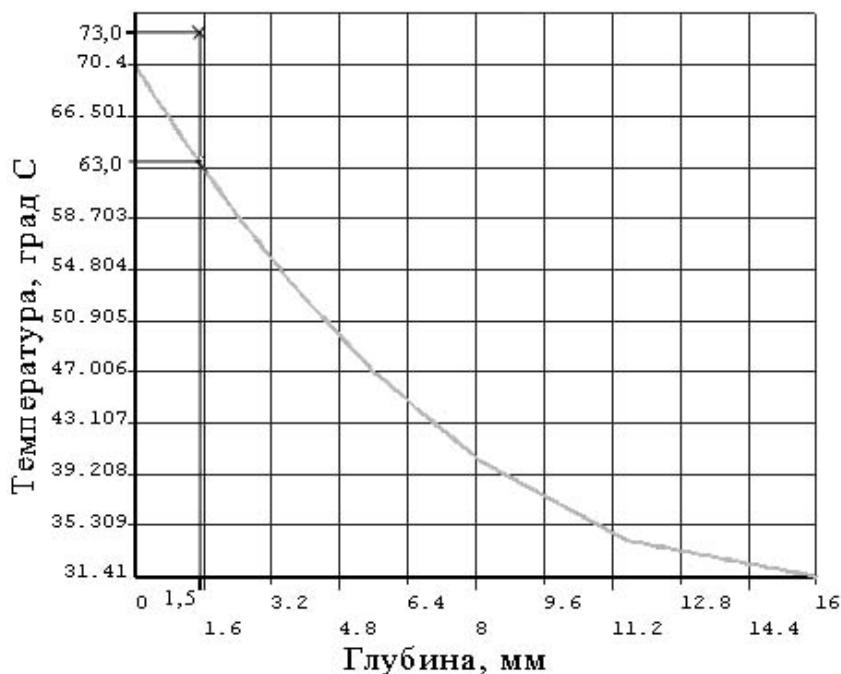


Рис. 8. Расчетное распределение суммарной температуры по глубине (х -эксперимент №4).
Вертикальной линией отмечена точка, в которой производился замер температуры.

Эксперимент № 3 проводился в условиях, существенно отличающихся от остальных – по величине окружающей температуры, по скорости скольжения и длительности испытания. Этим, по-видимому, и объясняются более значительные отклонения расчета и эксперимента, нежели в других случаях. Как отмечалось выше, при постановке задачи принималось, что длительность действия теплового источника относительно кратковременная, поэтому решение является справедливым для теплового потока, целиком идущего в трущиеся тела, без потерь на радиацию и конвекцию. Для очень больших интервалов времени тепло будет передаваться в поперечном направлении к более холодным частям движущегося тела, и будет также расходоваться в результате радиации и конвекции, что необходимо учитывать при постановке задачи.

Таким образом, выполненные вычисления и сравнение полученных результатов расчетов и экспериментов показывают, что разработанный метод расчета удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Метод расчета позволяет выполнять вычислительные эксперименты в широком диапазоне рабочих параметров нагружения и условий теплоотвода, а также прогнозировать температуру в зоне контакта и на глубине под поверхностью контакта, что дает возможность оценивать тепловое состояние контакта и подбирать антифрикционные материалы по их температурной стойкости.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Проект 06-08-00363).

Литература

1. Крагельский И.В. Трение и износ. М: «Машиностроение», 1968. С.480.
2. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М: «Машиностроение», 1980. С.135.
3. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. М: «Машиностроение», 1986. С.223.
4. Надеин В.А., Дроздов Ю.Н., Пучков В.Н., Пучков М.В. Характеристики маятниковых подшипников скольжения – сейсмоизолятов//Вестник машиностроения, №2, 2007, с.47-53.
5. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Пучков В.Н. Трибологические характеристики фрикционных сейсмоизолятов маятникового типа// Трение и износ, №2, 2007, т.28, с.119-127.
6. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Пучков В.Н. Влияние параметров землетрясений на трибологические характеристики фрикционных маятниковых подшипников (сейсмоизолятов)// Проблемы машиностроения и надежности машин, №2, 2007, с.45-55.
7. Constantinou M.C., Mokha A.S., Reinhorn A.M. (1990) "Experimental and Analytical Study of a Combined Sliding Disc Bearing and Helical Steel Spring Isolation System", Report NCEER-90-0019, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
8. Машиностроение. Энциклопедия, том IV-1, Редактор-составитель Д.Н.Решетов М.: Машиностроение, 1995 г. с. 236-237.
9. Семенов А.П., Савинский Ю.Э. Металлофторопластовые подшипники. М: «Машиностроение», 1976. С.190.
10. Garlock Bearings, Inc.(1987), «DU Self-Lubricating Bearings», Catalog 781-C, Thorofare, New Jersey.
11. Constantinou M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y., Fenz, D.M., Warn, G.P. (2007). "Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading", Report MCEER-07, State of California Department of Transportation Project 65A0174.
12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М: Мир, 1979. С. 392.

Поступила: 14.06.10.