

DOI: <https://doi.org/10.69722/1694-8211-2024-56-216-222>

УДК: 621.793.79

Арзыматов Б. М., преподаватель

e-mail: arzymatov bolot@mail.ru

ORCID: 0009-0007-6557-6755

ИГУ им. К. Тыныстанова, г. Каракол, Кыргызстан

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВАКУУМНЫХ ПОДШИПНИКОВ С НАНЕСЁННЫМИ ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ МЕТОДОМ КОНТАКТНОГО МАССОПЕРЕНОСА

Одним из перспективных методов представляется метод контактного массопереноса (МКМ), разработанный на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана под руководством д.т.н. Л. И. Волчкевича и к.т.н. И. Л. Волчкевича. Поскольку работы, посвященные применению данного метода к нанесению твердосмазочных покрытий, являются малоизученными, то задачей исследований было определение технологических режимов его осуществления и долговечности покрытия при его работе в вакууме. Представлены результаты экспериментальных исследований долговечности вакуумных подшипников с нанесёнными твердосмазочными покрытиями методом контактного массопереноса. Показано, что твердосмазочные покрытия, нанесённые методом контактного массопереноса, являются перспективными.

Ключевые слова: *метод контактного массопереноса, твердосмазочные покрытия, вакуумные подшипники, долговечность покрытия, поток газовой выделенной, момент сопротивления механизма, диагностика высоковакуумных вводов.*

Арзыматов Б. М., окутуучу

arzymatov bolot@mail.ru

ORCID: 0009-0007-6557-6755

К. Тыныстанов ат. ЫМУ, Каракол ш., Кыргызстан

КОНТАКТТЫК МАССА ӨТКӨРҮҮ ЫКМАСЫ МЕНЕН АЛЫНГАН ВАКУУМДУК ПОДШИПНИКТЕРДЕГИ КАТУУ МАЙЛУУ КАПТАМАЛАРДЫН УЗАККА ТУРУКТУУЛУГУ

Эң келечектүүлөрдүн бири болуп Н. Э. Бауман атындагы Москва мамлекеттик техникалык университетинин «Машина куруудагы электрондук технологиялары» кафедрасында техника илимдеринин доктору Л. И. Волчкевичтин жана техника илимдеринин кандидаты И. Л. Волчкевичтин жетекчилиги астында иштелип чыккан контакттык массаны өткөрүү ыкмасы саналат. Бул ыкманы катуу майлоочу каптамаларды колдонууга арналган иштер начар изилденгендиктен, изилдөөнүн милдети аны ишке ашыруунун технологиялык режимдерин жана вакуум чөйрөсүндө иштетилгенде жабуунун узакка туруктуулугун аныктоо болгон. Контакттык масса өткөрүү ыкмасы боюнча катуу майлоочу каптоо менен вакуумдук подшипниктердин узакка туруктуулугун эксперименталдык изилдөөлөрдүн натыйжалары берилген. Контакттык масса өткөрүү ыкмасы менен алынган катуу майлоочу каптамалар келечектүүлөрдүн катарына кирери көрсөтүлгөн.

Түйүндүү сөздөр: *контакттык масса өткөрүү ыкмасы, катуу майлоочу каптамалар, вакуумдук подшипниктер, каптаманын узакка туруктуулугу, газ чыгуу агымы, механизмдин каршылык моменти, жогору вакуумдук киргизүүнүн диагностикасы.*

Arzymatov B. M., teacher

e-mail: arzymatov bolot@mail.ru

ORCID: 0009-0007-6557-6755

ISU named after. K. Tynystanova, Karakol, Kyrgyzstan

DURABILITY OF VACUUM BEARINGS WITH APPLIED SOLID LUBRICANT COATINGS CONTACT MASS TRANSFER METHOD

One of the most promising methods seems to be the contact mass transfer method developed at

the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Moscow State Technical University named after N. E. Bauman under the guidance of Doctor of Technical Sciences L. I. Volchkevich and Ph.D. I. L. Volchkevich. Since the works devoted to the application of this method to the application of solid lubricant coatings are poorly studied, the task of the research was to determine the technological modes of its implementation and the durability of the coating when operating in a vacuum. The results of experimental studies of the durability of vacuum bearings with applied solid lubricant coatings using the contact mass transfer method are presented. It has been shown that solid lubricant coatings applied by contact mass transfer are promising.

Key words: *contact mass transfer method, solid lubricant coatings, vacuum bearings, coating durability, gas release flow, moment of resistance of the mechanism, diagnostics of high-vacuum bushings.*

Экспериментальный стенд и методика экспериментов

В вакууме происходит интенсивное испарение обычных жидких и консистентных смазок, сублимация твердых веществ, скорость этих процессов с увеличением температуры значительно возрастает. Поэтому использование обычных смазок, применяемых в атмосфере невозможно. Поэтому все большее применение находят узлы сухого трения, элементы которых либо изготовлены из самосмазывающихся конструкционных материалов, либо на них нанесены твердые смазочные покрытия (ТСП). В качестве твердых смазочных материалов применяют различные органические и неорганические соединения, а также тонкие металлические покрытия [1]. Эти покрытия, разделяя поверхности трения от непосредственного контакта, облегчают и ускоряют процесс их приработки, уменьшают коэффициент трения и исключают возможность схватывания и заедания поверхностей при трении. Одним из перспективным представляется метод контактного массопереноса (МКМ) разработанный на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана под руководством д.т.н. Л. И. Волчкевича и к.т.н. И. Л. Волчкевича [2]. Поскольку работы, посвященные применению данного метода к нанесению твердосмазочных покрытий являются малоизученными, то задачей исследований было определение технологических режимов его осуществления и долговечности покрытия при его работе в вакууме. Для оценки работоспособности вакуумных механизмов с нанесёнными покрытиями методом контактного массопереноса были выбраны следующие информативные параметры [3, 4, 5]:

1. давление или поток газовой выделения, как параметры, характеризующие интенсивность трибологических процессов, происходящих на поверхностях трения [3,4];

2. момент сопротивления механизма как параметр, характеризующий потери энергии в парах трения, реализуемые в механизме, работающем в вакууме [4,5].

На рисунке 1 показан стенд, предназначенный для диагностики высоковакуумных вводов вращательного движения в безмасляном вакууме с давлением до $P = 3 \cdot 10^{-5}$ Па. Вакуумная система стенда содержит камеру (поз.1) из стали 12Х18Н10Т объемом 16 л, откачные и измерительные средства. На стенде установлен эксцентриковый ввод вращения ВЭС-Э (поз.2) с испытуемым подшипником. Уплотнения всех фланцев камеры выполнены металлическими, что позволяет прогревать ее до 250°C. Для проведения обезгаживающего прогрева камера оборудована наружным нихромовым нагревателем. Вакуумная система включает механический насос 2НВР-5ДМ (поз. 3), паромасляный диффузионный насос Н-1С (поз.4) и два магниторазрядных насоса НМДО-0,1-1 (поз.5).

Предварительное разряжение $6.7 \cdot 10^{-1}$ Па, необходимое для запуска магниторазрядных насосов, создается механическим насосом через линию с клапанами, диффузионным насосом и двумя термоэлектрическими ловушками ТВЛ-100-2. Окончательное разряжение $3 \cdot 10^{-5}$ Па достигается магниторазрядными насосами после прогрева вакуумной системы при температуре 250°C в течение 10...12 часов. Без

прогрева предельное остаточное давление в камере составляет $(1...4) \cdot 10^{-4}$ Па после откачки магнитоэлектрическими насосами более 10 часов.

Вакуумная измерительная система станда включает два манометрических ионизационных преобразователя ПМИ-27 с вакуумметрами ВИ-14 (поз.7, 8), ионизационный ПМИ-2 и термопарный ПИТ-2 преобразователи с вакуумметром ВИТ-2 (поз. 6) и масс-спектрометр ИПДО-2 с датчиком РМО-4С (поз.9). Также в состав станда входит гелиевый течеискатель ПТИ-10, подсоединяемый к вакуумной системе станда через клапан К15. Для проведения точных измерений газовых потоков вакуумная камера разделена регулируемой диафрагмой с приводом вращения (поз.11) и натекателем (поз.10). Вращение испытуемого ввода производится двигателем постоянного тока с регулируемой частотой вращения ТТРВ2922-120-А с блоком питания ТРА-3320 (поз.12), частоту вращения двигателя вращения можно установить от 5 до 3000 об/мин. Регистрация наработки привода в оборотах входного вала производится электронным счетчиком импульсов Ф5007 (поз. 16), на который подаются сигналы от фотоэлектрического датчика (поз. 14), установленного против флажка закрепленного на валу электродвигателя, с этого же датчика производится съем сигнала оборотов для привязки диагностических сигналов.

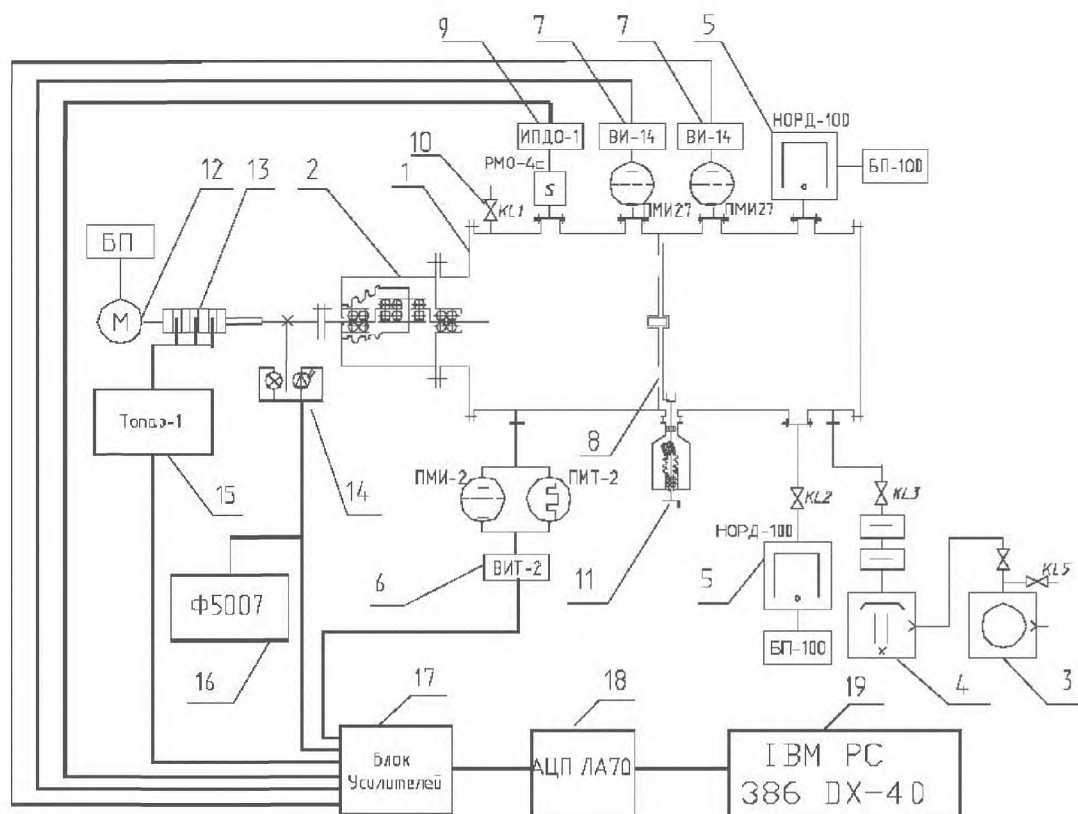


Рис. 1. Схема экспериментального станда: 1-вакуумная камера; 2-ввод ВЭС-Э с испытуемым подшипником; 3 - форвакуумный насос; 4 - паромасляный насос; 5 - магнитоэлектрический насос НОРД-100; 6 - вакуумметр ВИТ-2; 7-вакуумметр ВИ-14; 8-переменная диафрагма; 9 - масс-спектрометр ИПДО-2; 10 - натекатель; 11 - привод регулируемой диафрагмы; 12 - двигатель постоянного тока ТТРВ-120-5 с блоком питания; 13 - торсион; 14 - датчик оборотов; 15 - тензоусилитель "Тоназ-1"; 16 - электронный счетчик импульсов Ф5007; 17 - блок усилителей; 18 - плата АЦП ЛА70М3; 19 - персональный компьютер 386ДХ-40.

Измерение момента сопротивления ввода движения производится с помощью, установленного между электродвигателем и вводом, торсионным измерителем момента (поз.13) с наклеенными на него тензодатчиками. Сигнал с вращающегося торсиона снимается с помощью токосъемников и подается на вход тензоусилителя "Топаз-1" (поз.15), с выхода которого сигнал подается на вход блока усилителей (поз. 17). Измеряемые сигналы усиливаются блоком усилителей (поз.17) и подаются на вход платы АЦП ЛА70М3 (поз.18) после преобразования информации в цифровом виде записывается в память персонального компьютера 386DX-40 (поз.19). Итого основные технические характеристики экспериментального стенда:

1. Предельное остаточное давление, Па. $3 \cdot 10^{-5}$
2. Температура прогрева, °С..... 250
3. Диапазон частот вращения, об/мин..... 6–3000
4. Максимальная потребляемая мощность, квт..... 9
5. Габаритные размеры, мм 2800x800x1800

Чертеж ввода вращения ВЭС-Э с испытуемыми подшипниками №1,2,3 приведен на рис. 2. Экспериментальные исследования производились в три этапа. Первый этап включал в себя испытания вакуумного механизма с подшипниками на долговечность с параллельным съемом следующих диагностических параметров: момент сопротивления входного вала механизма; остаточное давление в камере; масс-спектр остаточного давления. Второй этап - обработка полученных данных и диагностика текущего состояния механизма. Третий этап - расчет прогноза о времени наработки механизма на отказ. Такой подход удобен тем, что позволяет, при наличии на экспериментальной установке мощного компьютера производить обработку данных в реальном времени, т.е. первый, второй и третий этапы осуществляются параллельно, либо (в случае отсутствия такого компьютера) обработку данных (второй и третий этап) можно производить после съема данных.

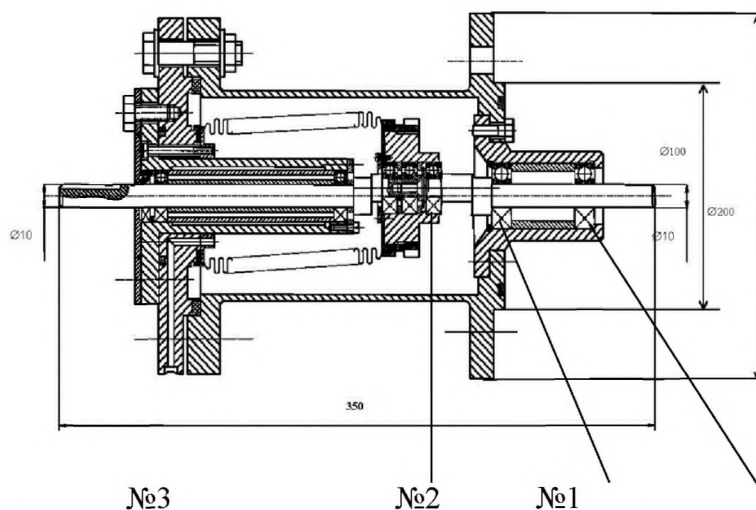


Рис. 2. Ввод вращения ВЭС-Э с испытуемыми подшипниками №1,2,3

Для проведения исследований экспериментальная установка откачивалась до давления $P=3 \cdot 10^{-5}$ Па, далее включался двигатель привода (частота вращения $n=200$ об/мин) ввод движения выполнял 1-3 тысячи циклов (в зависимости от состояния ввода), затем ввод останавливался, выдерживалось некоторое время, пока давление в

камере не придет к первоначальному уровню, затем включался привод ввода и производился съём диагностических сигналов: давления P , момента сопротивления M_c и числа оборотов ввода. Ввод включался на 40-60 секунд для того, чтобы в камере установилось давление при работающем вводе движения. Измерения производилось с помощью программы сбора данных VM.EXE и платы АЦП ЛА70М3. Измерение давления, момента сопротивления и оборотов ввода производились одновременно, частота сбора данных $F_{сб}=40$ Гц/канал. Полученные данные сохранялись в файлах с именами: ммддix.dat – шаблон имен файлов сигналов давления, момента и оборотов где: мм – номер месяца, когда производится эксперимент, дд – номер дня, когда производится эксперимент, i – индекс для файла с данными о давлении, моменте и оборотах, x – номер текущего измерения.

Затем снова включался ввод движения в режиме постоянной работы на 1-3 тысячи циклов, после чего цикл съёма диагностических сигналов повторялся. Эксперимент проводился до тех пор, пока момент сопротивления M_c не превысит заданного порогового значения $M_{c.пред.}$ (для ВЭС-Э $M_{c.пред.} = 2$ Нм). Так как сигналы момента и давления имеют различную природу и, соответственно, различные свойства и характеристики, то и их обработка имеет различия необходимые для более полного анализа свойств этих сигналов. Предварительная обработка данных заключается в пересчёте файлов данных из массива двухбайтных чисел, в котором сохраняет данные АЦП, в массивы данных: момента в Нм, давления в Па и сигнала оборотов. Далее оцениваются основные статистические параметры сигналов. Обработка сигнала момента производится в интервале времени, когда срабатывает датчик оборотов для того чтобы обрабатывались только данные сигнала момента работающего механизма. Обработка сигнала давления производится так же не с момента начала работы механизма а через некоторое время задержки T_3 , которое зависит от постоянной вакуумной системы V/S и от потока газовой выделения из вакуумного механизма Q_M , это делается для того чтобы переходные процессы происходящие в вакуумной системе не включались в обрабатываемые данные.

Результаты экспериментальных исследований.

Программа работ:

1. с подшипниками, в которых шарики не были покрыты твёрдосмазочным покрытием, т.е. с “чистыми” подшипниками.
2. с подшипниками, в которых шарики были покрыты твердосмазочным покрытием MoS_2 нанесёнными методом контактного массопереноса.
3. с подшипниками, в которых шарики были покрыты твердосмазочным покрытием свинца (Pb) методом контактного массопереноса.

Проведённые эксперименты позволили сделать следующие выводы:

- 1) У вакуумных подшипников, с твёрдосмазочными покрытиями, нанесёнными методом контактного массопереноса, наблюдается схожая динамика роста момента сопротивления и потока газовой выделения: в начале эксперимента (в период приработки подшипника). Имеются небольшие всплески у M_c и Q , далее их значения стабильны и лишь в конце эксперимента наблюдался существенный рост момента сопротивления, что сопровождалось пиками всплесков максимального потока газовой выделения Q_{max} .

2) Вакуумные подшипники с нанесёнными свинцовыми покрытиями (при оптимальных режимах МКМ) показали при этих трибологических испытаниях наилучшие результаты, что вполне согласуется с теоретическими выкладками.

3) Суммарная полученная наработка подшипников с ТСП покрытиями, нанесёнными методом контактного массопереноса, составило более 270 тыс. циклов т.е. 30 часов, при значениях максимального момента сопротивления не более 0.2 – 0.4 Нм (рисунок 3), а также полученные нами данные по газовыделению сравнительно с исследованиями [6] (рисунок 4, 5) дают основания считать эти покрытия перспективными [7, 8, 9].

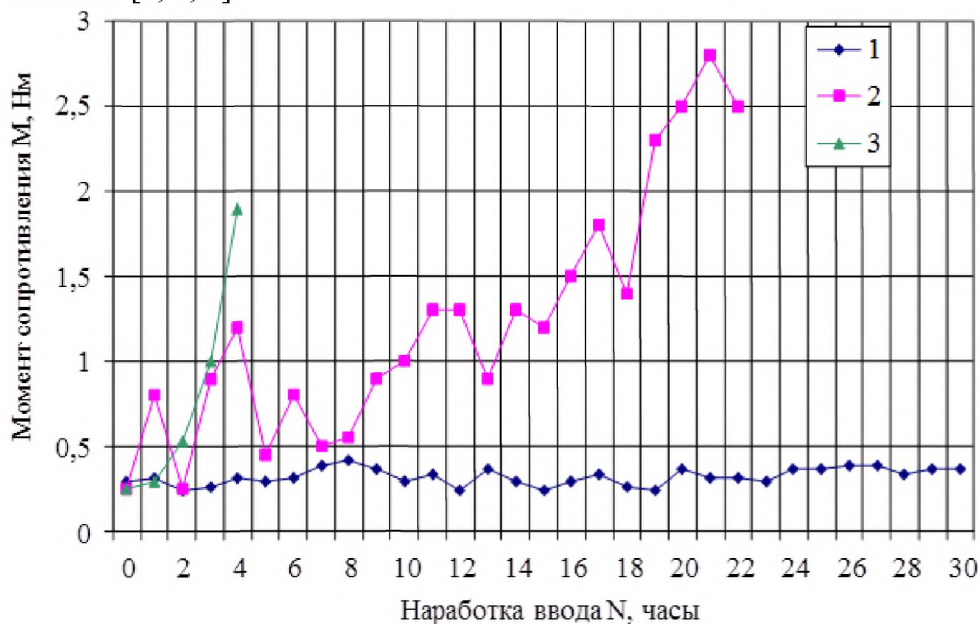


Рис. 3. Моменты сопротивления ввода движения ВЭС-Э в зависимости от наработки, где применялись подшипники: 1-со свинцовым покрытием, 2-покрытием из дисульфида молибдена, 3-без покрытия.

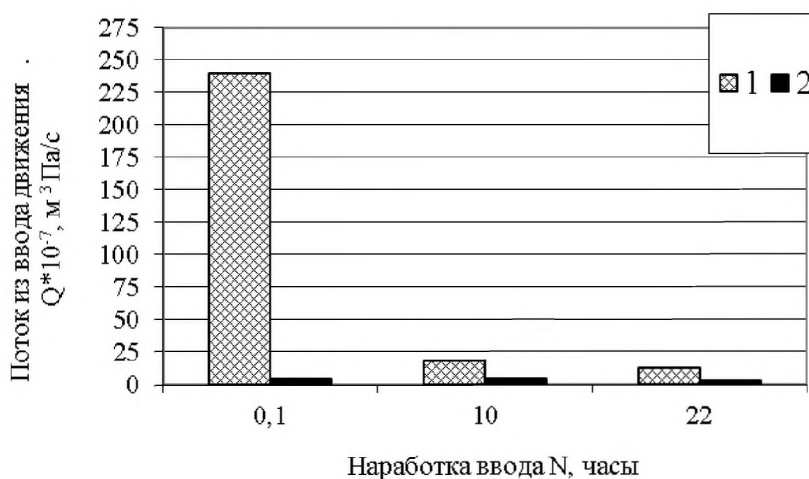


Рис. 4. Сравнительные данные потока газовыделения из ввода движения в зависимости от наработки, где применялись подшипники: 1 - осаждённый MoS₂ ионно-плазменным методом, 2 - нанесённый MoS₂ методом контактного массопереноса.

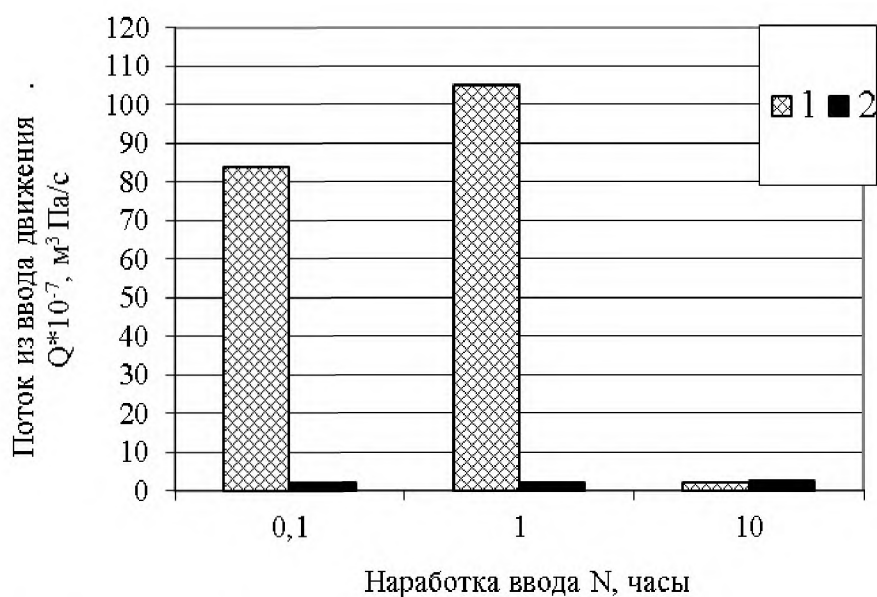


Рис. 5. Сравнительные данные потока газовой выделения из ввода движения в зависимости от наработки, где применялись подшипники: 1 - осаждённый Ag ионно-плазменным методом, 2 - нанесённый Pb методом контактного массопереноса.

Литература:

1. Цеев, Н. А., Козелкин, В. В., Гуров, А. А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме. // Справочник /Под общ. Ред. Козелкина В. В. -М.: Маш-е, 1991. -192 с.
2. Волчкевич, Л. И., Волчкевич, И. Л. Импульсно - динамическое нанесение тонкоплёночных покрытий. // Метроном.- 1994.- №5-6. - С. 35-37.
3. Пересадыко, А. Г., Система диагностики механических элементов вакуумного оборудования: Дисс. канд. техн. наук (05.27.07). - М., 2000. - 134 с.
4. Деулин, Е. А., Пересадыко, А. Г. Диагностика и прогнозирование отказов механических элементов вакуумного оборудования// Контроль. Диагностика. - 1998. - №5, - С.21-28.
5. Peresadko, A. G., Nevshupa, A. A., Deulin, E. A. Mechanically stimulated outgassing from ball bearing in vacuum. – Vacuum 64 (2002) pp. 451-456.
6. Desorption from ball bearings in ultrahigh vacuum, H. Yasui, K. Kakumoto, Y. Koyo. Eng. J. 1991, 139: 106-11 (in Japanese).
7. Solid lubricant mass contact transfer technology usage for vacuum ball bearings longevity increasing. В Arzymatov and E Deulin. Journal of Physics: Conference Series, Volume 729, 23rd International Conference on Vacuum Technique and Technology 7–9 June 2016, St. Petersburg, Russia Citation В. Arzymatov and E Deulin 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 729 012027 DOI 10.1088/1742-6596/729/1/012027
8. Кабаева, Г. Д., Арзыматов, Б. М. Исследование долговечности твёрдосмазочных покрытий на деталях вакуумных подшипников, нанесенных методом контактного массопереноса. // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. -Бишкек: КГТУ.- 2023. - №3(67). - С. 1541-1548, ISSN: 1694-5557.
9. Арзыматов, Б. М. Моделирование процесса контактного массопереноса покрытий на вакуумных подшипниках. // Вестник Иссык-Кульского университета. 2023. - № 55. - С. 266-274.