

УДК 621.891:519.28

DOI: 10.12737/article\_5ac49dc34fc6b9.65746767

П.Н. Хопин

## ОЦЕНКА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРИРАБОТКИ ПАР ТРЕНИЯ С ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В результате проведения планируемых экспериментов получены модели 2-го порядка для оценки продолжительности приработки пар трения с твердосмазочными покрытиями (ТСП) ВНИИ НП 212 для условий нормальной атмосферы и вакуума. Рассчитаны корреляционные зависимости продолжительности приработки от общей наработки рас-

сматриваемых пар трения. Выявлено определяющее влияние скоростного фактора на продолжительность приработки в рассмотренных условиях.

**Ключевые слова:** пара трения, приработка, твердосмазочные покрытия, нормальная атмосфера, вакуум.

P.N. Khopin

## ESTIMATE OF FRICTION PAIR RUNNING-IN DURATION WITH SOLID LUBRICANT COATING UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

As a result of planned experimental investigations there are calculated polynomial models of the 2-d order for the estimate of the duration of friction pair running-in with solid lubricant coatings (SLC) VNIИ NP 212 for the conditions of vacuum and normal environment. The correlation dependence between a running-in duration and a general operating time of the friction mating under consideration is defined. The

most substantial factor of a slip velocity influencing most upon running-in duration both under conditions of common environment, and in vacuum is revealed. It is defined that running-in duration exceeds in vacuum 7-11 times similar tribotechnical index for conditions of common environment.

**Key words:** friction pair, running-in, solid lubricant coatings, common environment, vacuum.

### Введение

Начальная стадия изнашивания деталей машин и механизмов сопровождается процессом приработки, при котором происходят изменения геометрии поверхности трения и физико-химических свойств материала [1].

Для узлов трения, автономно функционирующих как в нормальной атмосфере, так и в условиях вакуума, радиации, при повышенной температуре и нагрузках, соизмеримых с пределом текучести материала основы, широко используются твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе дисульфида молибдена, графита со связующими веществами типа ВНИИ НП, ВАП и др. Проведёнными ранее исследованиями [2] этапа приработки рассматриваемых ТСП установлено, что период приработки указанных фрикционных сопряжений сопровождается резким повышением коэффициента трения  $f_{тр}$  и температу-

ры трения  $T_{тр}$  (в 1,5-2 раза) по сравнению с установившимся уровнем. Вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75-80 %) приходится на период приработки и лишь 20-25 % - на установившийся режим трения. Исходная толщина ТСП ( $\approx 20$  мкм) уменьшается настолько (2-5 мкм), что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную плёнку  $MoS_2$ .

Учитывая важность точной оценки степени приработанности указанных фрикционных сопряжений, целью данной работы являлось прогнозирование продолжительности периода приработки рассматриваемых сопряжений для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных факторов в различных условиях их функционирования.

### Методика проведения исследований

Эксперименты осуществлялись на стенде для изучения трения и износа в вакууме и на модернизированной установке для проведения комплексных испытаний на трение при повышенной температуре с бесступенчатой регулировкой параметров трения [3]. Непрерывная запись в ходе экспериментов как коэффициента трения

( $f_{тр}$ ), так и температуры трения ( $T_{тр}$ ) позволила произвести оценку динамики изменения теплофрикционного режима трения в процессе наработки для исследуемой пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 (на основе  $MoS_2$  с мочевиноформальдегидной связкой). Материал контртела - закалённая до HRC 60 сталь ХВГ.

### Результаты исследований

На первом этапе проводилась оценка продолжительности периода приработки в условиях вакуума. Для получения комплексной модели эксперимент проводился с использованием ротатбельного планирования 2-го порядка. Уровни и диапазоны варьирования факторов представлены в табл. 1.

В качестве параметра оптимизации принималась продолжительность прира-

ботки  $\tau_{прир}$ , которая оценивалась по стабилизации коэффициента трения. Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Анализ полученных данных (табл. 2) показал, что продолжительность приработки в вакууме по отношению к общей наработке составила от 24 до 41 %, что существенно превышает пропорции для нормальных атмосферных условий.

Таблица 1

Уровни и диапазоны варьирования факторов в эксперименте по исследованию работоспособности пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума

Уровни факторов	Натуральные значения		Кодовые значения	
	Скорость скольжения V, м/с	Нагрузка $N \cdot 9,8, H$ (контактное давление P, МПа)	$X_1$	$X_2$
Интервал варьирования	0,148	25	I	I
Основной уровень	0,295	95,25 (91)	0	0
Верхний уровень	0,443	120,25 (115)	+1	+1
Нижний уровень	0,147	70,25 (68)	-1	-1
Звездные точки: + $\alpha$ - $\alpha$	0,504	130,5 (121)	+1,41	+1,41
	0,087	60,0 (61)	-1,41	-1,41

После проведения преобразований математическая модель  $\tau_{прир}$  в зависимости от контактного давления P и скорости

скольжения V в кодовом выражении факторов имела вид

$$Y = 256,3 - 210,9X_1 - 87,5X_2 + 35,5X_1X_2 + 107,3X_1^2 + 21,7X_2^2,$$

где Y - параметр оптимизации ( $\tau_{прир}$ ) в кодовом выражении;  $X_1, X_2$  - скорость

скольжения и контактная нагрузка в кодовом выражении.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты экспериментов при исследовании работоспособности пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума

№ п/п	Уровни факторов				Исследуемые параметры		$\tau_{\text{прир.}}$ , в % к $\tau$
	В кодовом масштабе		В натуральном масштабе		$\tau$ , мин	$\tau_{\text{прир.}}$ , мин	
	X1	X2	V, м/с	N · 9,8, Н			
1.	-1	-1	0,147	70,25	3424	720	21,0
2.	+1	-1	0,443	70,25	612	243	39,7
3.	-1	+1	0,147	120,25	1152	480	41,7
4.	+1	+1	0,443	120,25	445	145	32,6
5.	-1,41	0	0,087	95,25	2978	772	25,9
6.	+1,41	0	0,504	95,25	448	151	33,7
7.	0	-1,41	0,295	60	1050	418	39,8
8.	0	+1,41	0,295	130,5	620	161	26,0
9.	0	0	0,295	95,25	880	255	29,0
10.	0	0	0,295	95,25	761	244	32,1
11.	0	0	0,295	95,25	838	204	24,3
12.	0	0	0,295	95,25	942	282	30,0
13.	0	0	0,295	95,25	980	289	29,5

Анализ диаграммы, представленной на рис. 1, показывает, что наибольшее влияние на продолжительность приработки оказывает скорость скольжения пары трения. Очевидно, что длительность приработки тесно связана с общей долговеч-

ностью работы пары трения с ТСП. С использованием полученных экспериментальных данных была рассчитана корреляционная зависимость продолжительности приработки  $\tau_{\text{прир}}$  и общей наработки  $\tau$  пары с ТСП в вакууме (рис. 2):

$$\tau = 0,005\tau_{\text{прир.}}^2 - 0,973\tau_{\text{прир.}} + 610,3. \quad (1)$$

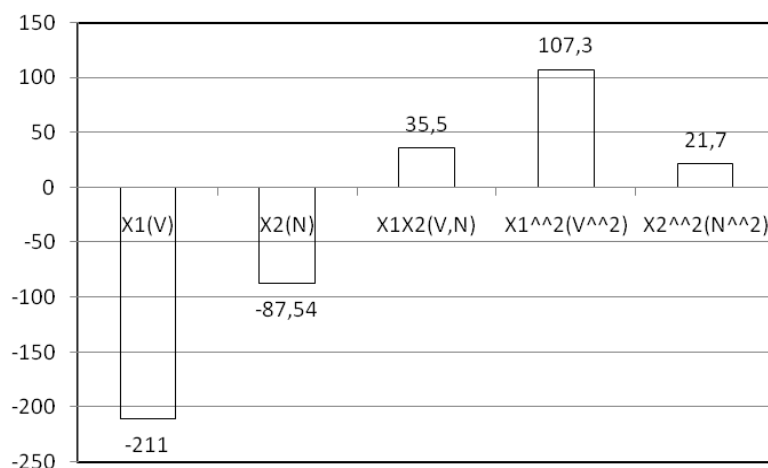


Рис. 1. Влияние нагрузочно-скоростных факторов на продолжительность приработки пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме

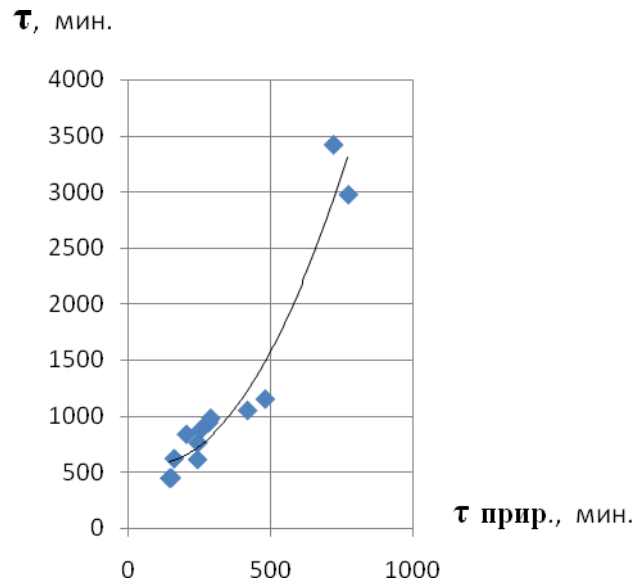


Рис. 2. Корреляционная зависимость продолжительности приработки  $\tau_{\text{прир}}$  от общей долговечности  $\tau$  пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума.

В результате обработки данных планируемого эксперимента (табл. 2) после проведения преобразований искомая математическая модель для оценки продолжительности приработки в вакууме в зави-

симости от скорости скольжения  $V$  и контактного давления  $P$  (рассчитывалось с учётом площади контактной дорожки трения, измеренной после соответствующего эксперимента) имела следующий вид:

$$\tau_{\text{прир.}} = 2242 - 5633V - 16,43P + 12,6VP + 5027V^2 + 0,047P^2,$$

где  $\tau_{\text{прир}}$  - продолжительность приработки, мин;  $V$  - скорость скольжения пары трения, м/с;  $P$  - контактное давление, МПа.

Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рис. 3. Анализ модели показывает монотонно возрастающую продолжительность прира-

ботки при снижении скорости скольжения и контактного давления.

С использованием полученной ранее комплексной модели оценки долговечности работы пары трения для условий вакуума [3]

$$\tau = 10804,7 - 34849V - 66,75P + 22791,34V^2 + 166,03VP$$

и математической модели для расчёта температуры трения для условий вакуума

$$T_{\text{тр.}} = 3,31 + 291,64V + 0,643P - 282,19V^2$$

для расчёта долговечности пар с ТСП ВНИИ НП 212 была предложена корреляционная зависимость [4]

$$\tau = 4 \cdot 10^9 T_{\text{тр.}}^{-3,206}. \quad (2)$$

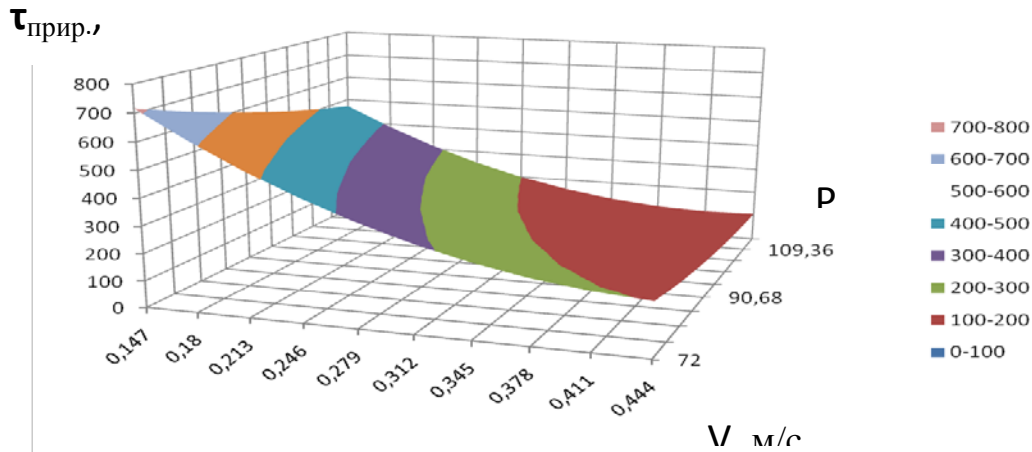


Рис. 3. Зависимость продолжительности приработки пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме от скорости скольжения и контактного давления

С использованием зависимости (2) в одной системе отсчёта были построены сравнительные комплексные зависимости продолжительности приработки и общей долговечности рассматриваемых сопряжений с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума (рис. 4).

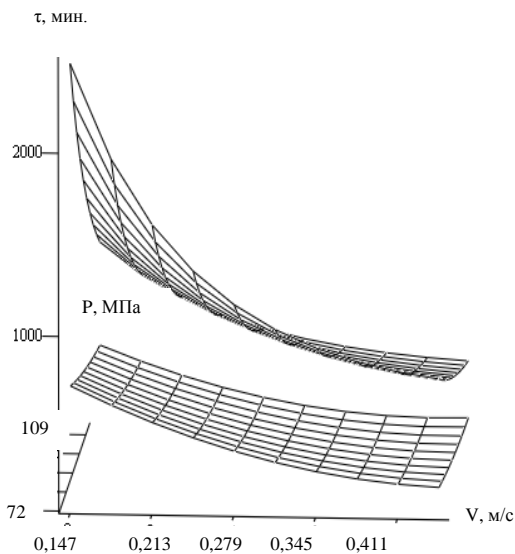


Рис. 4. Комплексные зависимости продолжительности приработки в вакууме (нижняя поверхность) и общей долговечности (верхняя поверхность) пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 от контактного давления и скорости скольжения

Графический анализ соотношения продолжительности приработки и общей наработки проводился методом построения зависимостей  $\tau = f(V)$  или  $\tau = f(P)$  для основных уровней соответствующих торцов (рис. 5, 6). Представленные графики дают наглядную картину соотношения продолжительности приработки и общей наработки узла с ТСП применительно к условиям вакуума.

Анализ графиков, приведённых на рис. 5, 6 показывает, что продолжительность приработки пар трения с ТСП по отношению к общей долговечности работы сопряжения составляет от 26 до 33 %.

На следующем этапе работы ставилась задача оценки продолжительности приработки для условий нормальной атмосферы с целью расчёта этой характеристики для произвольного сочетания контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$  и последующего сравнения с условиями вакуума.

Для получения комплексной модели эксперимент проводился с использованием ротатбельного планирования 2-го порядка. Уровни и диапазоны варьирования факторов принимались аналогичными условиям вакуума (табл. 1).

Долг., мин.

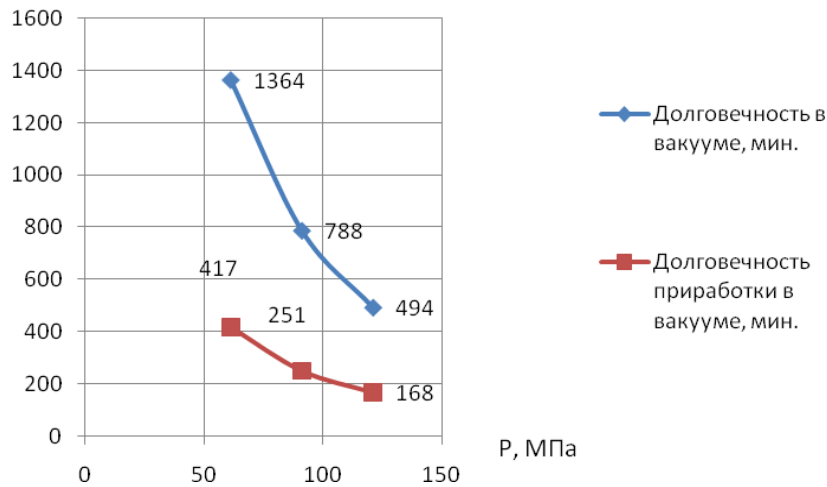


Рис. 5. Зависимость продолжительности приработки и общей наработки пар с ТСП ВНИИ НП 212 от контактного давления в вакууме при  $V=0,295$  м/с

Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в табл. 3.

После проведения преобразований математическая модель  $\tau_{\text{прир}}$  в зависимости

$$Y = 22,4 - 30,36X_1 - 4,52X_2 + 1,39X_1X_2 + 17,73X_1^2 - 3,66X_2^2,$$

где  $Y$  - параметр оптимизации ( $\tau_{\text{прир}}$ ) в кодовом выражении;  $X_1$ ,  $X_2$  - скорость скольжения и контактная нагрузка в кодовом выражении.

Анализ диаграммы, представленной на рис. 7, показывает, что наибольшее

от нагрузочно-скоростных факторов в кодовом выражении имела вид

влияние на продолжительность приработки оказывает скорость скольжения пары трения.

Долг., мин.

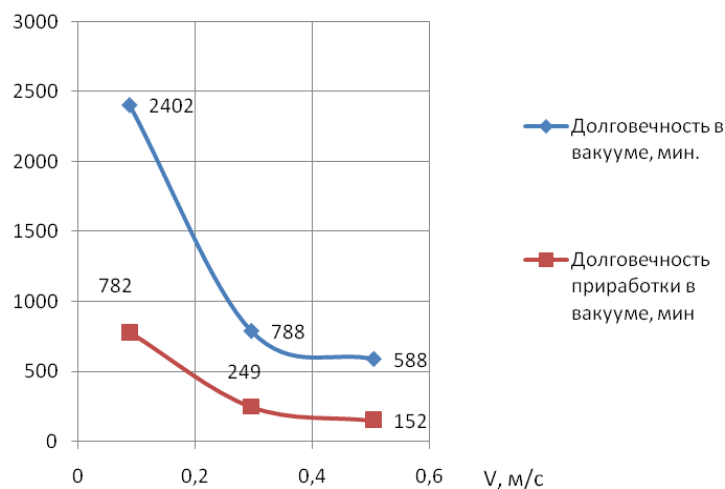


Рис. 6. Зависимость продолжительности приработки и общей наработки пар с ТСП ВНИИ НП 212 от скорости скольжения в условиях вакуума при  $P = 91,2$  МПа

Таблица 3

Матрица планирования и результаты экспериментов при исследовании прирабатываемости пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях нормальной атмосферы

№ п/п	Уровни факторов				$\tau_{\text{прир.}}$ мин
	В кодовом масштабе		В натуральном масштабе		
	X1	X2	V, м/с	N · 9,8, Н	
1.	-1	-1	0,147	70,25	72,74
2.	+1	-1	0,443	70,25	9,24
3.	-1	+1	0,147	120,25	60,92
4.	+1	+1	0,443	120,25	2,98
5.	-1,41	0	0,087	95,25	100,4903
6.	+1,41	0	0,504	95,25	14,8751
7.	0	-1,41	0,295	60	21,4898
8.	0	+1,41	0,295	130,5	8,7434
9.	0	0	0,295	95,25	22,4
10.	0	0	0,295	95,25	22,4
11.	0	0	0,295	95,25	22,4
12.	0	0	0,295	95,25	22,4
13.	0	0	0,295	95,25	22,4

С использованием результатов планируемого эксперимента (табл. 3) после проведения преобразований искомая математическая модель для оценки продолжительности приработки в условиях нормальной атмосферы в зависимости от ско-

рости скольжения и контактного давления (рассчитывалось с учётом площади контактной дорожки трения, измеренной после соответствующего эксперимента) имела следующий вид:

$$\tau_{\text{прир.}} = 116 - 225,7V + 0,32P + 0,008VP + 110,8V^2 - 0,0031P^2, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{прир.}}$  - продолжительность приработки, мин;  $V$  - скорость скольжения пары трения, м/с;  $P$  - контактное давление, МПа.

Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рис. 8.

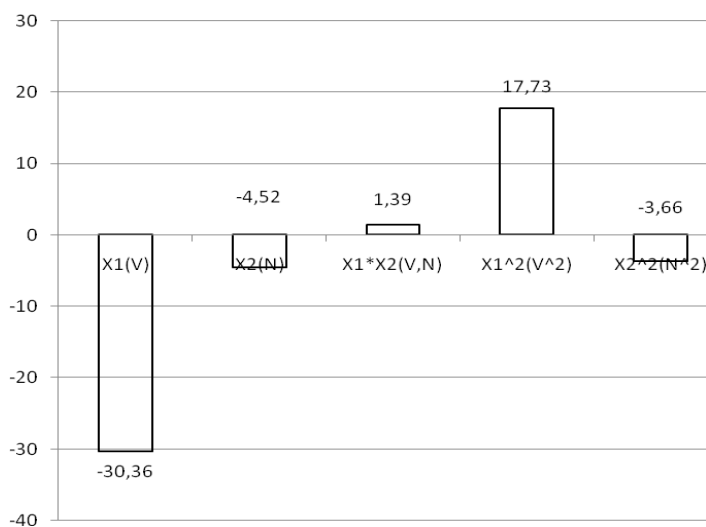


Рис. 7. Влияние отдельных факторов на продолжительность приработки пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях нормальной атмосферы

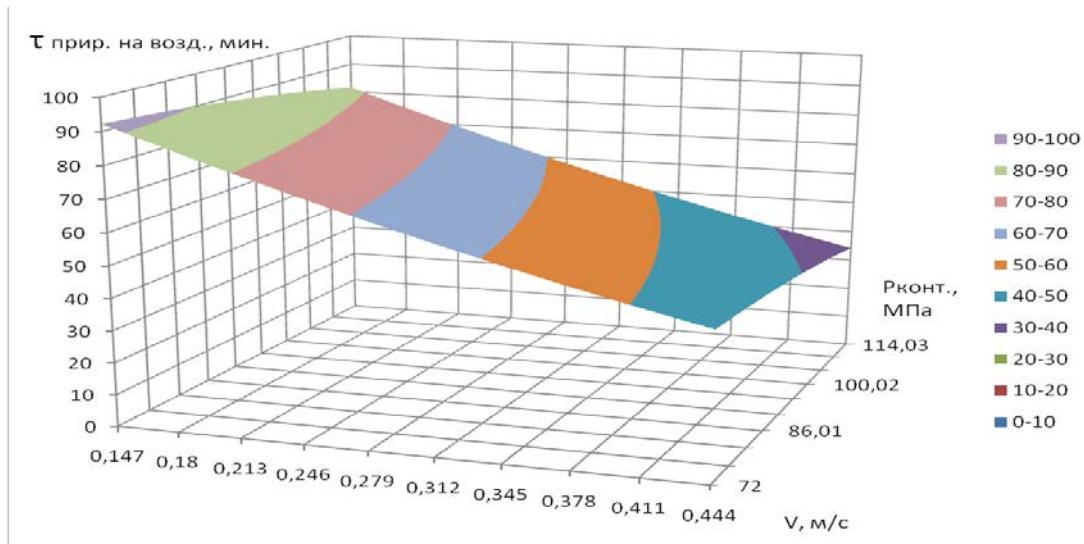


Рис. 8. Зависимость продолжительности приработки пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях нормальной атмосферы от скорости скольжения и контактного давления

Анализ модели показывает монотонно возрастающую продолжительность приработки при снижении скорости скольжения и контактного давления.

С использованием зависимостей (1) и (3) в одной системе отсчёта были построены сравнительные комплексные зависимости продолжительности приработки со-

пряжений с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума и нормальной атмосферы для рассматриваемых диапазонов варьирования факторов  $P$  и  $V$  (рис. 9).

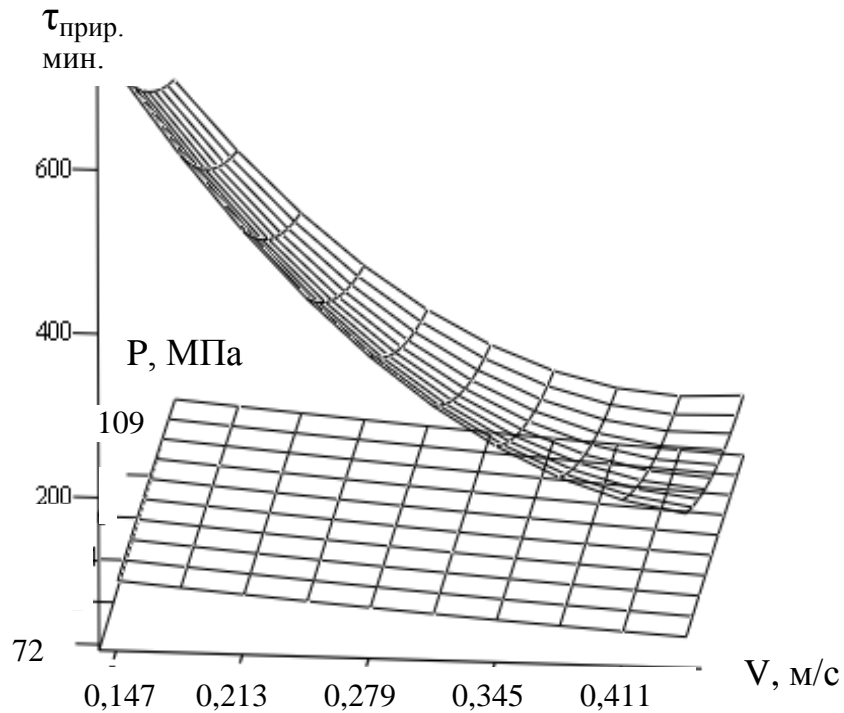


Рис. 9. Комплексные зависимости продолжительности приработки в вакууме (верхняя поверхность) и в условиях нормальной атмосферы (нижняя поверхность) пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 от контактного давления и скорости скольжения



С целью сравнения прирабатываемости пар трения с ТСП для условий вакуума и нормальной атмосферы была построена табл. 4.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 9, показывает преобладающее влияние на продолжительность приработ-

ки скорости скольжения  $V$ , которая тесно взаимосвязана с температурой трения. Для сравнительной оценки искомого соотношения был построен график  $\tau_{\text{прир}} = f(V)$  для основного уровня  $P = 91$  МПа (рис. 10).

Таблица 4

Сравнение продолжительности приработки пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 для нормальных атмосферных условий и вакуума

$\tau_{\text{прир}}$ в вакууме, мин	$\tau_{\text{прир}}$ в нормальной атмосфере (НА), мин	$\tau_{\text{прир}}$ в НА к $\tau_{\text{прир}}$ в вакууме, %
720	72,74	10,1028
243	9,24	3,80247
480	60,92	12,6917
145	2,98	2,05517
772	100,49	13,0169
151	14,8751	9,85106
418	21,4898	5,1411
161	8,7434	5,43068
255	22,4	8,78431
244	22,4	9,18033
204	22,4	10,9804
282	22,4	7,94326
289	22,4	7,75087

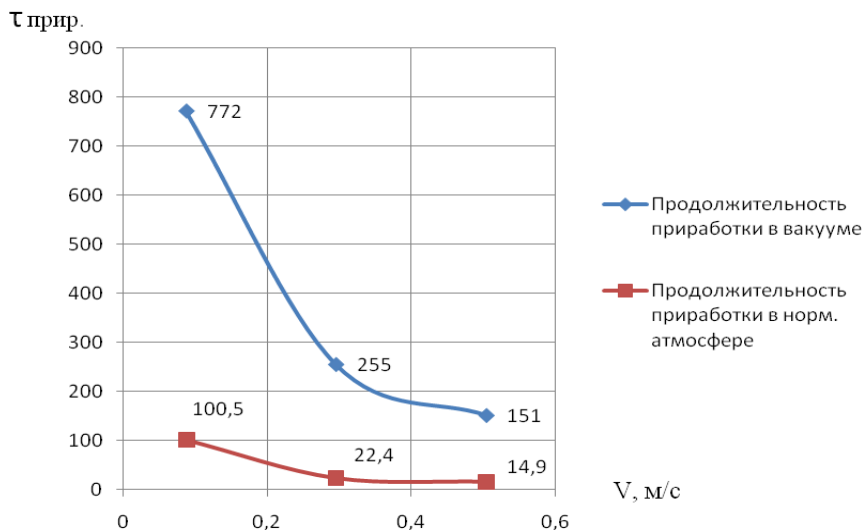


Рис.

Зависимости продолжительности приработки в вакууме и в условиях нормальной атмосферы для пары с ТСП ВНИИ НП 212

10.

Анализ представленных на рис. 10 данных показывает, что:

1.  $\tau_{\text{прир}}$  в условиях вакуума при малых скоростях скольжения ( $V = 0,087$  м/с) составляет 12,9 ч и в 5 раз превосходит аналогичный параметр для  $V = 0,5$  м/с (2,5 ч).

2.  $\tau_{\text{прир}}$  в условиях вакуума в 7-11 раз превосходит  $\tau_{\text{прир}}$  в условиях нормальной атмосферы.

Последний вывод можно объяснить тем, что при малых значениях  $P$  и  $V$ , когда температура трения в зоне контакта незначительна и не оказывает существенного влияния на долговечность фрикционного сопряжения, основную роль играет воздействие окружающей среды, а именно наличие кислорода воздуха, приводящее к окислению смазочной поверхности пары трения. Особое значение последнее об-

стоятельство приобретает для ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, отличающихся повышенной окисляемостью поверхности трения. С увеличением скорости скольжения наибольшее влияние на долговечность рассматриваемой пары трения начинает ока-

### Выводы

1. В результате обработки данных планируемого эксперимента получены комплексные модели 2-го порядка для расчёта продолжительности приработки пар трения скольжения с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума и нормальной атмосферы при произвольном сочетании скорости скольжения и контактного давления для рассмотренных диапазонов варьирования указанных факторов.

2. На основе полученных экспериментальных данных выявлена корреляционная зависимость продолжительности приработки  $\tau_{\text{прир}}$  и общей наработки  $\tau$  пары с ТСП в вакууме; рассчитана соответствующая зависимость.

3. Анализ диаграмм влияющих факторов показал, что наибольшее влияние на

зывать контактная температура трения. Её повышение вызывает ускоренное разрушение связующих составляющих смазочной плёнки, термодеструкция которых определяет ресурс работы сопряжения с ТСП.

продолжительность приработки как в условиях вакуума, так и в нормальной атмосфере оказывает скорость скольжения пары трения.

4. Продолжительность приработки в вакууме по отношению к общей наработке составила от 24 до 41 %.

5. Продолжительность приработки в условиях вакуума при малых скоростях скольжения ( $V = 0,087$  м/с) составляет 12,9 ч и в 5 раз превосходит аналогичный параметр для  $V = 0,5$  м/с (2,5 ч).

6. Продолжительность приработки в условиях вакуума в 7-11 раз превосходит аналогичный показатель для условий нормальной атмосферы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасик, И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения / И.И. Карасик. - М.: Наука, 1978. - 136 с.
2. Хопин, П.Н. Исследование прирабатываемости пар трения с твердосмазочными покрытиями / П.Н. Хопин // Технология машиностроения. - 2011. - № 7 (109). - С. 44-49.

1. Karasik, I.I. *Running-in Ability of Materials for Slider Bearings* / I.I. Karasik. - M.: Science, 1978. - pp. 136.
2. Khopin, P.N. Investigation of running-in ability of friction pairs with solid lubricant coatings / P.N. Khopin // *Engineering Techniques*. - 2011. - No.7 (109). - pp. 44-49.

3. Хопин, П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования / П.Н. Хопин. - М.: МАТИ, 2012. - 255 с.
4. Хопин, П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума / П.Н. Хопин // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. - 2016. - № 2. - С. 85-90.

3. Khopin, P.N. *Working Capacity Integrated Assessment of Friction Pairs with Solid Lubricant Coatings under Different Operational Conditions* / P.N. Khopin. - M.: MATI, 2012. - pp. 255.
4. Khopin, P.N. *Assessment of working capacity of friction pairs with solid lubricant coatings under conditions of vacuum* / P.N. Khopin // *Bulletin of Lavochkin STC*. - 2016. - No.2. - pp. 85-90.

Статья поступила в редколлегию 27.03.18.

Рецензент: д.т.н., профессор МАИ

Бойцов А.Г.

### Сведения об авторах:

Хопин Пётр Николаевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: [chopin@mail.ru](mailto:chopin@mail.ru).

**Khopin Peter Nikolaevich**, Prof. of Moscow Aircraft Institute (National Research University), e-mail: [chopin@mail.ru](mailto:chopin@mail.ru).