

Шаломов В. И.

ИТОГИ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

Шаломов В. И.

V. I. Shalomov

ИТОГИ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

RESULTS OF EXPERIMENTAL TESTING OF THEORETICAL CALCULATIONS OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF A SPINDLE UNIT ON GAS-STATIC BEARINGS



Шаломов Вячеслав Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: seu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav I. Shalomov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Heat Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: seu@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлены основные итоги экспериментальной проверки на опытном стенде теоретического расчёта выходных характеристик шпиндельных узлов с частично пористыми газостатическими опорами. Показаны результаты, свидетельствующие о достаточно качественном и количественном согласовании экспериментальных и расчетных выходных характеристик шпиндельного узла.

Summary. The paper presents key results of an experimental stand test of theoretical calculations of output characteristics of spindle units with partially porous gas static bearings. Results are presented which testify to both qualitative and quantitative matching of experimental and rated output characteristics of a spindle unit.

Ключевые слова: шлифовальный станок, шпиндельный узел, опытный стенд, выходные характеристики, режимы работы.

Key words: grinding machine, spindle unit, test stand, output characteristics, modes of operation.

УДК 621.924

Современные быстроходные и высокоточные шлифовальные, расточные и другие станки должны обеспечивать точность формы рабочих поверхностей порядка десятых долей микрометра при чистоте поверхности $R_a \leq 0,08$ мкм. Достижение таких показателей в немалой степени связано с эксплуатационными качествами подшипников шпиндельных узлов (ШУ) металлорежущих станков.

Наибольшее распространение в ШУ получили подшипники качения. Однако опыт эксплуатации ШУ шлифовальных станков с опорами различных типов показывает, что в ряде случаев применение газовых подшипников более предпочтительно. Особенно следует выделить газостатические опоры, поскольку они способны, из-за усредняющего эффекта газового слоя, обеспечить точность вращения шпинделя, равную $0,02 \dots 0,04$ мкм.

Для решения задач теоретического и экспериментального исследований выходных характеристик ШУ, установленных на частично пористых газостатических опорах, в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете развита методика теоретического расчёта характеристик и разработан оригинальный опытный стенд для экспериментальной проверки расчетных данных.

В основе методики расчета выходных характеристик ШУ лежат численное решение уравнения Рейнольдса теории газовой смазки и система уравнений статики [2, 40].

Опытный стенд, имитирующий работу ШУ на газостатических подшипниках с пористыми вставками шпоночной формы [3, 52], позволил провести экспериментальные исследования выходных характеристик при угловых смещениях шпинделя. Основные геометрические размеры элементов и узлов ШУ: длина подшипников $L_1 = L_2 = 60$ мм; диаметр подшипников $D = 51,11$ мм; средний радиальный зазор $c = 50$ мкм; раздвижка линий наддува в опоре $b = 24$ мм; раздвижка опор $a = 213$ мм; вылет шпинделя $l = 67,3$ мм.

К важнейшим выходным характеристикам шпиндельного узла, характеризующим его точность и технологическую эффективность, относятся нагрузка и жесткость, измеренные на консоли шпинделя. В теоретических исследованиях характеристики выражены в безразмерной форме.

Для представления характеристик ШУ в зависимости от безразмерного комплекса прямо пропорционально среднему радиальному зазору в рассмотрение введен конструктивный параметр K_c , определяемый соотношением

$$K_c = c \cdot \sqrt[3]{\frac{\delta}{12 \cdot k_p \cdot R}},$$

где δ – высота пористой вставки, м; k_p – коэффициент проницаемости пористых вставок; R – радиус подшипника, м, [1, 51].

Одинаковое значение конструктивного параметра $K_c = 0,302$ принято и в теоретических, и в экспериментальных исследованиях.

Эксперименты проведены в статическом и гибридном режимах работы газостатических опор.

Статические эксперименты, соответствующие работе газовых опор в режиме подвеса, выполнены при абсолютном давлении наддува сжатого воздуха в подшипниках p_s , равном 0,297; 0,397; 0,495 и 0,573 МПа. Соответственно этим значениям относительное давление наддува \bar{p}_s составляло 0,343; 0,258; 0,206 и 0,178. Выбор диапазона изменения давления сжатого воздуха на стенде основан на технических данных воздушной сети, применяемой на машиностроительных предприятиях. При постоянном значении установленного давления наддува в зазоре подшипников варьировалось давление сжатого воздуха на поршень нагрузочного устройства, имитирующего изменения механической нагрузки на шлифовальном круге шпинделя. С помощью микрометров измерялись угловые смещения вала в передней и задней опорах ШУ.

Результаты экспериментального исследования и теоретических расчетов относительной нагрузки на консоли вала \bar{F} и коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ при работе ШУ в режиме подвеса и относительном давлении наддува $\bar{p}_s = 0,178$ представлены на рис. 1, 2.

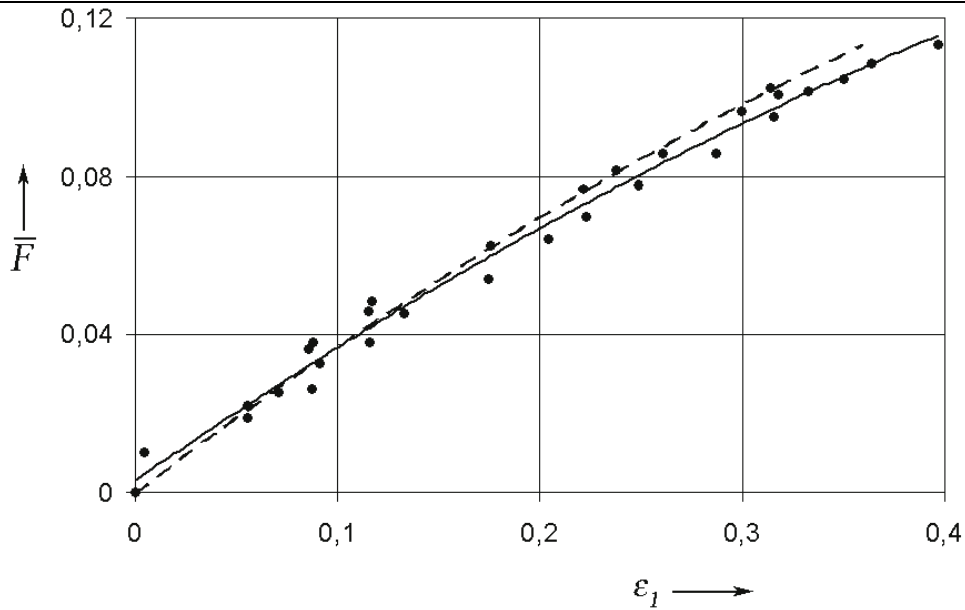


Рис. 1. Зависимость относительной нагрузки \bar{F} от относительного эксцентриситета ε_1 : — — — — теория; — — — — эксперимент

В качестве аргумента выбран относительный эксцентриситет ε_1 в переднем подшипнике, смещения шпинделя в котором являются наибольшими.

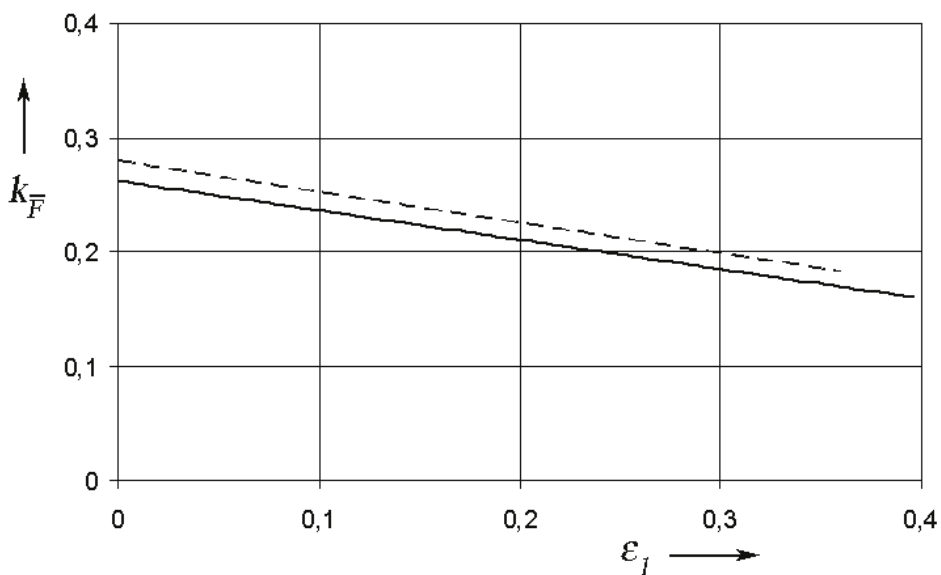


Рис. 2. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от относительного эксцентриситета ε_1 : — — — — теория; — — — — эксперимент

Графики зависимостей $\bar{F} = f(\varepsilon_1)$ и $k_{\bar{F}} = f(\varepsilon_1)$ наглядно показывают на вполне удовлетворительное согласование экспериментальных и теоретических данных во всем диапазоне относительного эксцентриситета ε_1 .

Так, при $\varepsilon_1 = 0,2$ относительная погрешность вычисления нагрузки на консоли шпинделя \bar{F} составляет 4 %, а при $\varepsilon_1 = 0,3$ – 5 %. Таким образом, максимальная относительная ошибка определения нагрузки на консоли шпинделя не превышает 5 %.



Относительная погрешность определения коэффициента жесткости во всем диапазоне относительного эксцентриситета ε_1 не превышает 8 %. Эксперимент подтверждает также, что большие значения коэффициента жесткости на консоли вала имеет при малых значениях относительного эксцентриситета.

Гибридный режим работы шпиндельных подшипников с внешним наддувом газа характеризуется наличием дополнительной подъемной силы, возникающей в результате вращения шпинделя. Механизм её образования заключается в том, что при вращении эксцентрично расположенного во вкладыше шпинделя, газ под действием касательных сил вязкости увлекается поверхностью шпинделя и заполняет клиновидный зазор между шпинделем и вкладышем. Такое явление часто называют эффектом самогенерации давления или эффектом смазочного клина. С учётом внешнего наддува это приводит к дополнительному сжатию газа в смазочном слое и такому распределению давления, в результате которого несущая способность подшипника увеличивается. Гибридный режим работы подшипников называют также комбинированным.

Для сравнения выходных характеристик ШУ при работе опор в гибридном режиме в теоретических и экспериментальных исследованиях использован такой безразмерный комплекс подобия газовых опор, как число сжимаемости. Число сжимаемости Λ прямо пропорционально угловой скорости шпинделя [2, 47].

Эксперименты в гибридном режиме работы газовых опор ШУ проведены при значениях относительного давления наддува \bar{p}_s , равных 0,399 и 0,258. При каждом значении давления наддува выполнено три серии экспериментов с различными значениями частоты вращения вала. Скорость вращения вала ШУ варьировалась изменением расхода сжатого воздуха через приводную турбину. При задаваемых значениях частоты вращения вала определялись быстроходность шпинделя и числа сжимаемости. Сводные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические показатели экспериментов

Относительное давление наддува \bar{p}_s	Частота вращения n , мин ⁻¹	Быстроходность $(D \cdot n)$, мм · мин ⁻¹	Число сжимаемости Λ
0,339	32000	$1,63 \cdot 10^6$	0,331
	24000	$1,23 \cdot 10^6$	0,249
	12000	$0,61 \cdot 10^6$	0,124
0,258	36500	$1,86 \cdot 10^6$	0,285
	24000	$1,22 \cdot 10^6$	0,187
	12000	$0,61 \cdot 10^6$	0,094

Обобщенную картину согласования результатов теоретических исследований и экспериментальных данных при давлении наддува $\bar{p}_s = 0,258$ представляют графики выходных характеристик в функции числа сжимаемости и относительного эксцентриситета в переднем подшипнике $\bar{F} = f(\Lambda, \varepsilon_1)$ и $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, \varepsilon_1)$, приведенные соответственно на рис. 3 и 4.

В целом анализ зависимостей $\bar{F} = f(\Lambda, \varepsilon_1)$ показал, что максимальная относительная ошибка в определении нагрузки на консоли вала достигается при относительном эксцентриситете $\varepsilon_1 = 0,3$ и составляет не более 6 %.

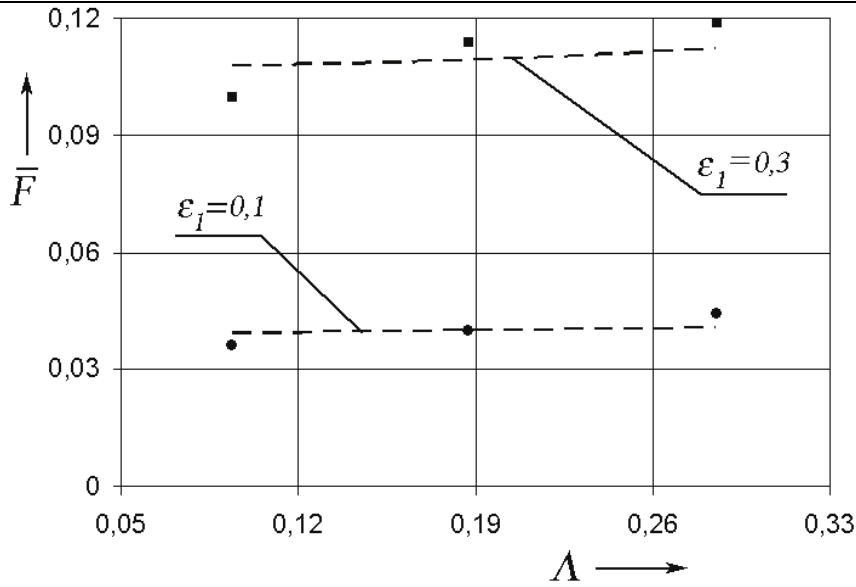


Рис. 3. Зависимость относительной нагрузки \bar{F} от числа сжимаемости Λ и относительного эксцентриситета ϵ_1 : ● – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,1$); ■ – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,3$); — — — — теория

Наибольшее расхождение теоретических и экспериментальных значений коэффициента угловой жёсткости в функции числа сжимаемости и относительного эксцентриситета $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, \epsilon_1)$ наблюдается при числе сжимаемости $\Lambda = 0,094$ и доходит до значений: при $\epsilon_1 = 0,1$ – 8 %, при $\epsilon_1 = 0,3$ – 13 %. Причем при увеличении частоты вращения вала наблюдается тенденция к снижению относительной ошибки в расчёте жёсткости на консоли шпинделя.

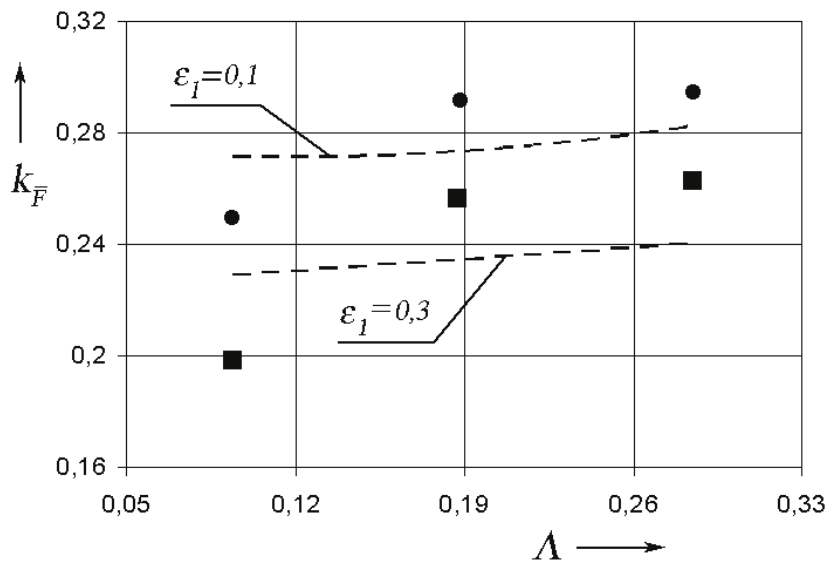


Рис. 4. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от числа сжимаемости Λ и относительного эксцентриситета ϵ_1 : ■ – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,3$); ● – эксперимент ($\epsilon_1 = 0,1$); — — — — теория

Так, при числе сжимаемости $\Lambda = 0,285$ относительная погрешность уже составляет 4,4 % при $\epsilon_1 = 0,1$ и 8 % при $\epsilon_1 = 0,3$.

Сопоставление результатов расчета и экспериментальных данных выходных характеристик ШУ в зависимости от числа сжимаемости Λ при различных значениях относительного давления наддува \bar{p}_s показано на рис. 5 и 6.

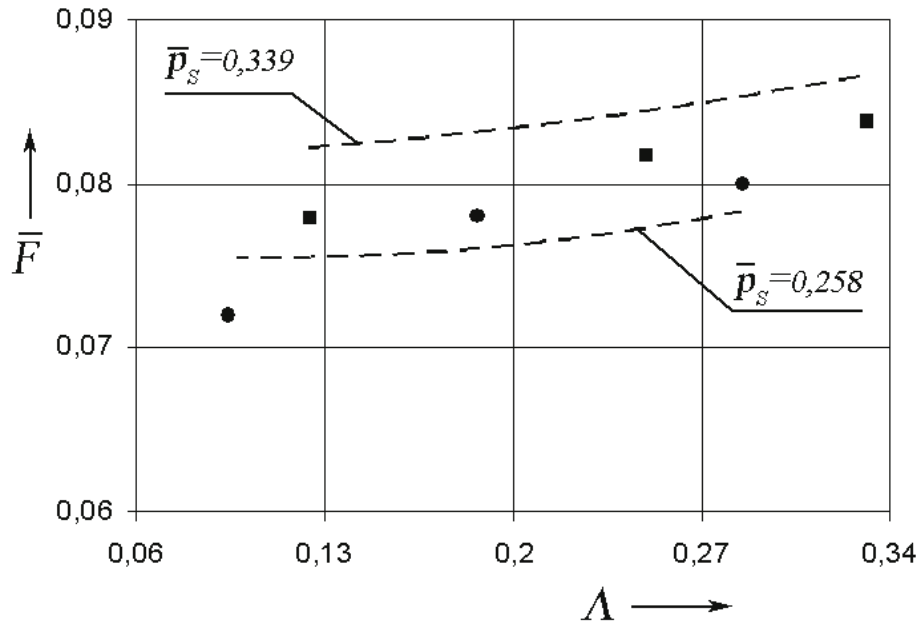


Рис. 5. Зависимость относительной нагрузки \bar{F} от числа сжимаемости Λ и относительного давления наддува \bar{p}_s : $\varepsilon_1 = 0,2$; ● – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,258$); ■ – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,339$); — — — — теория

Результаты испытаний показывают, что расчетные значения относительной нагрузки на консоли вала \bar{F} с достаточной точностью согласуются с экспериментальными данными.

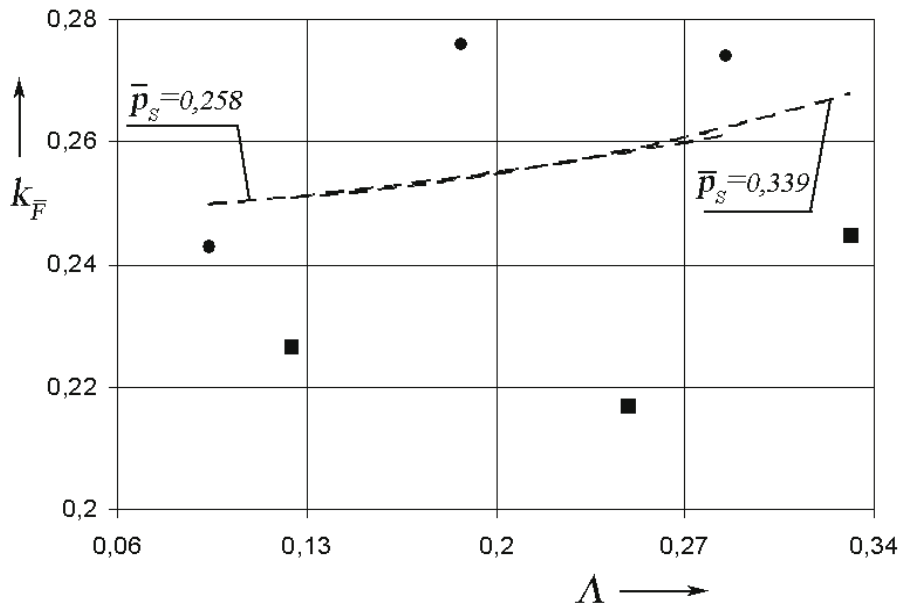


Рис. 6. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от числа сжимаемости Λ и относительного давления наддува \bar{p}_s : $\varepsilon_1 = 0,2$; ● – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,258$); ■ – эксперимент ($\bar{p}_s = 0,339$); — — — — теория

Шаломов В. И.

ИТОГИ ОПЫТНОЙ ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

Установлено, что максимальное расхождение теоретических и опытных зависимостей $\bar{F} = f(\Lambda, \bar{p}_s)$ составляет не более 6 %. На графике также просматривается, что с увеличением числа сжимаемости (частоты вращения шпинделя) относительная погрешность расчёта нагрузки на шлифовальном круге снижается при всех значениях относительного давления наддува.

Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента жёсткости в функции числа сжимаемости и относительного давления наддува $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, \bar{p}_s)$ (см. рис. 6) позволяет заключить, что максимальная относительная погрешность теоретического расчёта жёсткости на консоли шпинделя не превосходит 16 %. Такой результат для практики можно считать вполне приемлемым.

В целом полученные результаты говорят о достаточно качественном и количественном согласовании экспериментальных и расчетных выходных характеристик, что позволяет надежно использовать разработанную методику в инженерной практике проектирования ШУ на газостатических опорах с частично пористой стенкой вкладыша.

ЛИТЕРАТУРА

1. Космынин, А. В. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования / А. В. Космынин, В. С. Виноградов. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 327с.
2. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин, Ю. Г. Кабалдин, В. С. Виноградов, С. П. Чернобай. – М.: Академия естествознания, 2006. – 219 с.
3. Шаломов, В. И. Экспериментальный стенд для исследования выходных характеристик высокоскоростных шпиндельных узлов / В. И. Шаломов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности инвестиционной и инновационной деятельности в Дальневосточном регионе и странах АТР». – Комсомольск-на-Амуре, 2005. – С. 52-56.