

На правах рукописи



Чернейко Сергей Викторович

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УПОРНЫХ  
ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ  
ТЕКСТУРИРОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Специальность

05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

**Научный руководитель** – Задорожная Елена Анатольевна,  
доктор технических наук, доцент.

**Официальные  
оппоненты:**

Каминский Валерий Наумович,  
доктор технических наук, профессор,  
генеральный директор  
ОАО НПО «ТУРБОТЕХНИКА», г. Протвино  
профессор кафедры «Транспортные газотурбин-  
ные двигатели», МАМИ.

Новиков Евгений Александрович,  
кандидат технических наук,  
ЗАО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»,  
начальник отдела подшипников и уплотнений,  
доцент кафедры «Компрессорные машины и  
установки» КНИТУ, г. Казань.

**Ведущее предприятие** – ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
кафедра «Турбины и двигатели», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 29 апреля 2015 г., в 13.00 часов, на заседании специализированного диссертационного совета Д 212.298.09 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001, гл. корп.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на сайте <http://susu.ac.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, на имя ученого секретаря диссертационного совета, электронная почта: [d212.298.09@mail.ru](mailto:d212.298.09@mail.ru), контактный телефон (351) 267-91-23.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь специализированного  
диссертационного совета Д 212.298.09,  
доктор технических наук, профессор



Е.А.Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы.** Турбокомпрессоры (ТК) в настоящее время получили широкое распространение в энергетическом и транспортном машиностроении. Наибольшее применение в последнее время ТК нашли в системе наддува двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что позволяет значительно увеличить эффективную мощность двигателя, снизить удельный расход топлива. Для создания достаточного давления наддува ротор ТК должен вращаться с очень высокой скоростью, достигающей 10000 – 25000 1/с.

Одними из основных элементов, определяющих надежную работу ТК, являются узлы трения. В частности, для ограничения осевого движения ротора турбокомпрессора применяются упорные гидродинамические подшипники скольжения (ПС). Упорный ПС со стороны компрессора воспринимает осевые усилия, действующие на ротор в направлении от турбины к компрессору и должен обладать достаточной несущей способностью и надежностью в условиях высоких рабочих температур. Для охлаждения и повышения надежности ПС к ним подается под давлением моторное масло.

Ресурс ТК во многом определяет конструкция подшипников скольжения. Обычно упорный ПС состоит из пяты, вращающейся вместе с ротором, и неподвижного подпятника. Широкое распространение получили гидродинамические упорные ПС с макропрофилированием поверхности трения подпятника в виде сегментов с наклонными поверхностями, «ступеньками Рэлея» или иным профилем. В то же время в машиностроении для повышения несущей способности (НС) все большее распространение получает микропрофилирование поверхностей трения.

Положительный опыт использования одного из перспективных современных способов микропрофилирования – лазерного текстурирования (создание определенных свойств микропрофиля поверхности трения с помощью обработки лазерными импульсами) (ЛТ) для повышения НС различных трибосопряжений позволяет применить такой вид обработки и для упорных ПС турбокомпрессоров ДВС.

Исследованию работоспособности гидродинамических упорных ПС различных машин и механизмов посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Значительный вклад в решение задачи повышения их несущей способности внесли многие отечественные и зарубежные ученые: А.В. Алехин, С.Г. Дадаев, В.Н. Каминский, В.А. Максимов, Е.А. Новиков, Л.А. Савин, И.В. Сайчук, А.А. Стручков, В.И. Суркин, М.Е. Подольский, М.Б. Хадиев, К. Adachi, К. Aizawa, J.Y. Auloge, V. Brizmer, P. Bourgin, M. Fillon, S.B. Glavatskih, B. Gay, K. Kato, R.K. Pandey, R.K. Sharma, X. Wang и др.

Значительных успехов в исследовании микропрофилирования, в частности, ЛТ различных трибосопряжений, достигли: С.М. Allen, V. P. Bulatov, G. Dumitru, I. Etsion, M. Geiger, G. Halperin, D.B. Hamilton, P.B. Huynh, X.L. Kosta, Y. Kligerman, A. Kovalchenko, A. Ronen, G. Ryk, J.A. Walowit и др.

Однако анализ рассмотренных работ показал, что исследования ПС с лазерным текстурированием, как правило, носят экспериментальный, эмпирический характер. Математические модели и методики расчета НС и гидромеханических характеристик (ГМХ) упорных подшипников скольжения ТК с ЛТ практически не разработаны, что, безусловно, сдерживает их широкое внедрение в практику. Отсутствуют рекомендации по использованию современных смазочных материалов, обладающих неньютоновскими свойствами для таких ПС.

Поэтому проведение комплексных исследований по повышению несущей способности гидродинамических упорных подшипников скольжения турбокомпрессоров текстурированием поверхностей трения обуславливает актуальность представленной работы.

Основные разделы диссертации выполнены в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2015 годы (№П503, № 16.740.11.0073, № П2019, № 14.740.11.1284); при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 07-08-00554, № 10-08-00424, НК-13-08-00875/13/14); по государственному заданию Министерства образования и науки РФ (Регистрационный номер 7.2813.2011), а также в рамках гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по реализации прикладных исследований по лоту код 2014-14-579-0109. (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проект) RFMEFI57714X0102. Соглашение № 14.577.21.0102).

**Цель исследования** – повышение несущей способности гидродинамических упорных подшипников скольжения турбокомпрессоров текстурированием поверхностей трения.

#### **Задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель процессов, происходящих в смазочном слое гидродинамического упорного ПС с различными типами лазерного текстурирования поверхностей трения сегментов и учетом, в общем случае, неньютоновских свойств применяемых масел.

2. Разработать алгоритм и программу расчета несущей способности и гидромеханических характеристик упорных ПС с лазерным текстурированием поверхностей сегментов.

3. Провести экспериментальные исследования для оценки адекватности разработанной математической модели.

4. Исследовать влияние параметров лазерного текстурирования поверхности трения на несущую способность и гидромеханические характеристики упорных подшипников.

5. Определить наилучшие параметры лазерного текстурирования применительно к разработанной конструкции упорного ПС ротора турбокомпрессора ТКР-8,5С.

6. Сформировать на основе полученных результатов исследований рекомендации по проектированию упорных ПС.

#### **Научная новизна**

1. Разработана и численно реализована математическая модель процессов течения неньютоновской жидкости в смазочном слое гидродинамического упорного ПС с макро- и микропрофилированием поверхностей трения, позволяющая определять несущую способность и гидромеханические характеристики трибосопряжения с различными типами лазерного текстурирования.

2. Получены зависимости несущей способности и гидромеханических характеристик трибосопряжения, смазываемого неньютоновской жидкостью, от параметров лазерного текстурирования поверхностей трения с применением метода оптимизации для упорного ПС ротора турбокомпрессора.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

##### **Теоретическая значимость**

1. Разработанная математическая модель позволяет определять несущую способность и гидромеханические характеристики аналогичных трибосопряжений широкого класса роторных машин с лазерным текстурированием поверхностей трения, смазываемых неньютоновской жидкостью.

2. Полученные зависимости несущей способности и гидромеханических характеристик трибосопряжения, смазываемых неньютоновской жидкостью, от параметров лазерного текстурирования поверхностей трения, позволяют определить оптимальные параметры текстурирования для сегментных подпятников упорных подшипников скольжения различных турбокомпрессоров.

#### **Практическая значимость**

1. Создано и зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам программное обеспечение, позволяющее при проектировании гидродинамических упорных ПС оценить влияние на ГМХ различных типов лазерного текстурирования поверхностей трения, других конструктивных, режимных и эксплуатационных факторов.

2. На основе результатов параметрических исследований, выполненных с помощью разработанных при участии автора комплексов программ «Секторный подпятник» и «Секторный подпятник-II», предложено техническое решение, защищенное патентом на полезную модель «Упорный гидродинамический подшипник скольжения», которое позволяет повысить несущую способность и улучшить гидромеханические характеристики упорного ПС.

3. Выполнена оценка влияния геометрии сегментов упорного ПС на его несущую способность и гидромеханические характеристики, оптимизирован профиль несущей поверхности сегментов для упорного ПС турбокомпрессора ТКР-8,5С производства ОАО НПО «Турботехника».

#### **Методология и методы исследования**

**Объект исследования.** Процессы, происходящие в смазочном слое упорного подшипника скольжения с ЛТ поверхностей трения.

**Предмет исследования.** Закономерности, связывающие геометрические параметры лазерного текстурирования поверхностей трения упорного подшипника скольжения с его несущей способностью и гидромеханическими характеристиками.

**Методы исследования.** Математическое моделирование и экспериментальные исследования. Метод конечных разностей был использован для решения модифицированного уравнения Рейнольдса. Оптимизация ПС проведена на основе метода «Крутого восхождения». Экспериментальные исследования проводились в лаборатории триботехники Израильского технологического института – «Технион» (г. Хайфа).

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная математическая модель процессов течения неньютоновской жидкости в смазочном слое гидродинамического упорного ПС с макро- и микропрофилированием поверхностей трения.

2. Алгоритм численной реализации математической модели процессов течения неньютоновской жидкости в смазочном слое гидродинамического упорного ПС с макро- и микропрофилированием поверхностей трения.

3. Полученные зависимости несущей способности и гидромеханических характеристик трибосопряжения от параметров лазерного текстурирования поверхностей трения.

4. Результаты экспериментальных исследований.

5. Результаты расчета разработанной конструкции упорного ПС ротора турбокомпрессора ТКР-8,5С с лазерным текстурированием поверхностей трения на основе предложенного технического решения.

6. Рекомендации по проектированию упорных ПС с лазерным текстурированием поверхностей трения.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректной постановкой задач, обоснованностью используемых теоретических зависимостей и принятых допущений, применением хорошо известных численных математических методов; подтверждается качественным и количественным совпадением полученных результатов решения тестовых задач с известными теоретическими и экспериментальными результатами автора и зарубежных ученых.

**Реализация.** Разработанное методическое, алгоритмическое и программное обеспечение используется при проектировании упорных гидродинамических подшипников скольжения в ГСКБ «Трансдизель» г. Челябинск, а также в учебном курсе «Триботехника» при подготовке специалистов, бакалавров и магистров на автотракторном факультете Южно-Уральского государственного университета.

**Апробация.** Результаты работы были представлены и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Проблемы и перспективы развития евроазиатских транспортных систем (Челябинск, 2009, 2011); на международной конференции «The 8th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics» (Seoul, Korea, 2010); на XV международном конгрессе двигателестроителей (Харьков, Украина, 2010); на XXXXI Всероссийском симпозиуме по механике и процессам управления (г. Миасс, 2011); на XI Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи (Москва, 2011); на VIII международной научно-практической конференции «Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве» (Протвино, 2014); на международной научно-технической конференции ученых, ведущих специалистов в области трибологии и аспирантов «УРАЛ-ТРИБО» (Челябинск, 2014); на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета и Челябинской государственной агроинженерной академии (2009–2013).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, включая 4 статьи в научных сборниках и журналах рекомендованных ВАК РФ, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент на полезную модель.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и 3 приложений, изложена на 110 страницах машинописного текста, включая 52 иллюстрации, 14 таблиц, 38 формул и библиографический список, содержащий 94 наименования.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации, реализации и структуре диссертации.

**В первой главе** представлен обзор публикаций по упорным сегментным ПС с различной формой несущей поверхности. Проведен также обзор литературы по известным методикам гидродинамического расчета упорных ПС роторных машин.

Упорный гидродинамический ПС турбокомпрессора наддува ДВС расположен со стороны компрессорного колеса 2 ТК (рис. 1) и состоит из пяти 6, вращающейся вместе с ротором 3, и неподвижного подпятника 7. Поверхность подпятника разделена на сегменты 1 канавками 2 (рис. 2).

Основные математические модели гидродинамической теории смазки для ньютоновских жидкостей, на которых основаны современные методы расчета упорных ПС с неподвижными сегментами, были разработаны в трудах многих отечественных и зарубежных авторов.

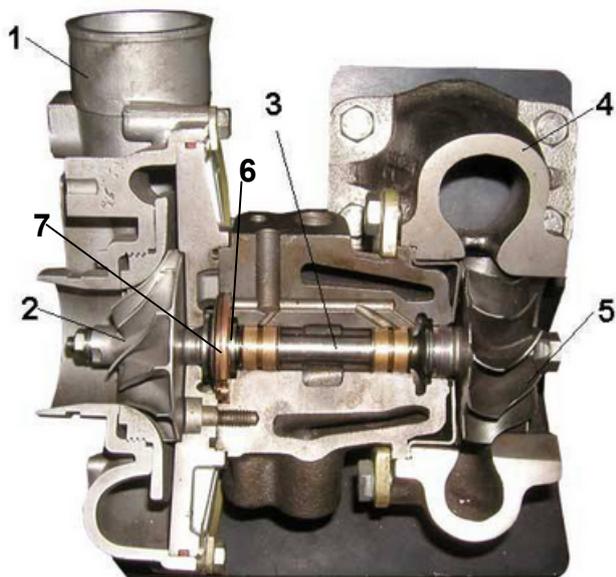


Рис. 1. ТК в разрезе (1 – корпус компрессорной части ТК; 2 – колесо компрессора; 3 – ротор; 4 – корпус турбинной части ТК; 5 – колесо турбины; 6 – пята; 7 – подпятник

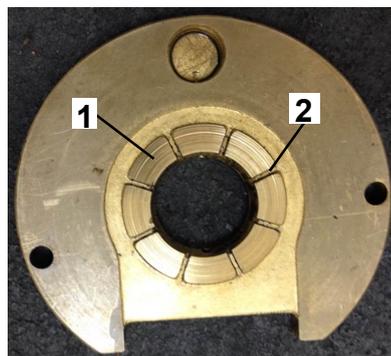


Рис. 2. Фотография сегментного подпятника:  
1 – сегмент;  
2 – маслоподводящая канавка

Для появления в смазочном слое (СС) упорного ПС гидродинамических давлений и соответствующей несущей силы ( $W, H$ ) необходимо формирование клиновидного зазора между поверхностью пяты и подпятником. Такой зазор обычно формируют за счет особого профилирования несущей поверхности упорного ПС. В настоящее время широкое распространение получили ПС с сегментами в форме «ступеньки Рэлея» и наклонной поверхности.

Схемы сегментов с такими формами поверхности представлены на рис. 3 а, б, где обозначено:  $U$  – окружная скорость пяты по среднему радиусу (м/с);  $Q$  – направление движения смазочного материала (СМ);  $h$  – толщина СС (м);  $h_y$  – установочный зазор (м);  $L$  – тангенциальный размер сегмента упорного ПС по дуге среднего размера (м);  $l_1, l_2$  – длина нижней и верхней частей сегмента;  $\gamma$  – угол наклона сегмента.

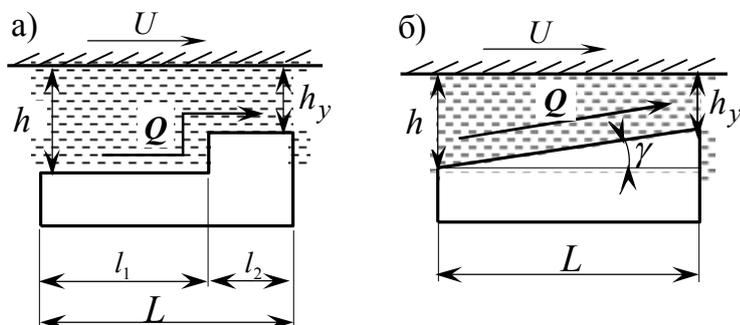


Рис. 3. Схема одного сегмента УП: а) «ступенька Рэлея»; б) наклонная поверхность  
товыми канавками и др.

Развитие технологии обработки несущих поверхностей трибосопряжений привело к разработке метода поверхностного текстурирования, который позволяет повысить НС и снизить потери на трение в упорном ПС. Результатом обработки является поверхность с микроямками, микроплощадками (микровыступами), вин-

Микроямки, выполненные на несущей поверхности ПС, работают аналогично «ступеньке Рэлея». Некоторое представление о распределении давлений в СС упорного ПС с нанесенными на его поверхности микроямками иллюстрирует рис. 4, где  $p$  – гидродинамические давления в СС.

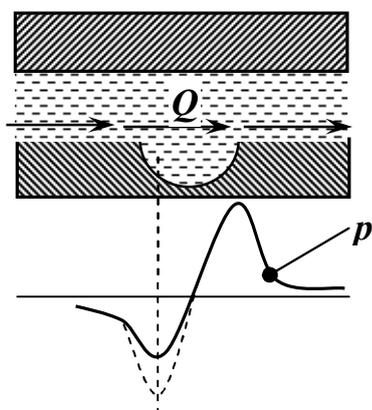


Рис. 4. Схема одной микроямки

Многие авторы отмечают еще одно свойство текстурированной поверхности, а именно, попадая в микроуглубления поверхности, СМ удерживается в них и действует как «второй источник смазки». Перемещение СМ из микроуглублений на горизонтальные участки поверхности приводит к уменьшению потерь на трение и замедляет гидроабразивный износ, особенно при смешанном и граничном трении. Фундаментальные работы по изучению лазерного текстурирования поверхности опубликованы I. Etsion, G. Halperin, Y. Kligerman, G. Ryk. Авторами выполнены исследования влияния текстурирования несущей поверхности различных трибосопряжений: механических и газовых уплотнений, упорных гидродинамических подшипников, а также узлов, совершающих возвратно-поступательное движение (компрессионные кольца).

Основой теоретических исследований упорных ПС является расчет эпюры гидродинамических давлений в СС. Обычно для ее определения в СС упорного ПС с текстурированной несущей поверхностью в виде микроямки использовалась двумерная модель уравнения Рейнольдса для ньютоновской жидкости. Однако большинство работ, посвященных влиянию лазерного текстурирования поверхностей трения на НС, потери на трение и износ трибосопряжения являются экспериментальными.

Рассмотренные теоретические работы не позволяют в полной мере оценить влияние формы, геометрии, расположения и плотности текстурирования на ГМХ упорных ПС применительно к ТК. Важным параметром, требующим отдельного внимания, является несущая способность текстурированных упорных ПС турбокомпрессоров, смазываемых современными моторными маслами с неньютоновскими свойствами.

Таким образом, на основании выполненного обзора отечественных и зарубежных литературных источников поставлены цель и задачи работы.

**Во второй главе** представлена математическая модель упорного ПС с лазерным текстурированием поверхности.

При создании математической модели упорных ПС были приняты следующие допущения: осевая нагрузка  $F$  на ротор постоянна и уравновешена реакциями СС; плоскость пяты параллельна плоскости подпятника и занимает определенное равновесное положение относительно корпуса; ось подшипника совпадает с осью вращения ротора.

На поверхности сегментов с помощью лазерного текстурирования нанесены микроямки (рис. 5) заданной глубины  $h_p$  (рис. 5, б), радиуса  $r_p$  (рис. 5, в), и плотности их распределения  $S_p = \pi r_p^2 / 4\kappa r_1^2$ , где  $\kappa = r_2 / r_1$ . Доля поверхности сегмента  $\alpha$  с ЛТ изменяется от 0 до 1. Каждая микроямка расположена в центре квадратной ячейки размером  $2r_1 \times 2r_2$  (рис. 5, в).

СМ подается по внутренней кольцевой канавке подшипника под давлением равным  $p_{вх}$  (рис. 5, а). Давление по внешнему радиусу подшипника принимается равным атмосферному  $p_a$ . Давление в радиальных канавках  $p_k$  полагается распределенным по ли-

нейному закону от  $p_{ex}$  до  $p_a$ . НС в смазочном слое упорного ПС образуется за счет множества гидродинамических клиньев в районе микроямок.

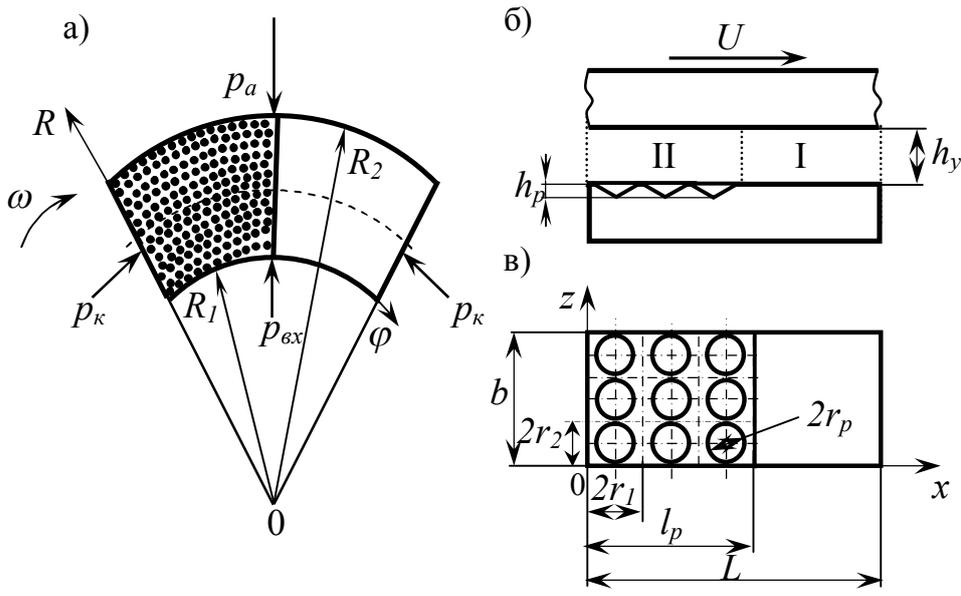


Рис. 5. Схема одного сегмента:  
 а) схема сегмента;  
 б) схема УП вид сбоку;  
 в) расчетная схема сегмента (вид сверху)

Толщина СС в нетекстурированной области I (рис. 5, б) равна  $h = h_y$ . Для определения толщины СС  $h^*$  в произвольной точке текстурированной области II введем локальную систему координат  $O_e x_e y_e z_e$  с началом  $O_e$  в центре ямки (рис. 6, а).

В зависимости от способа обработки образцов форма микроямок может отличаться, поэтому при составлении функции зазора в работе были учтены их возможные формы.

Для микроямок, выполненных в виде полусферы или обратного конуса (рис. 6, б, в), были получены выражения для толщины СС. Согласно рис. 6, б, в формулы для определения толщины СС в I и II областях имеют следующий вид:

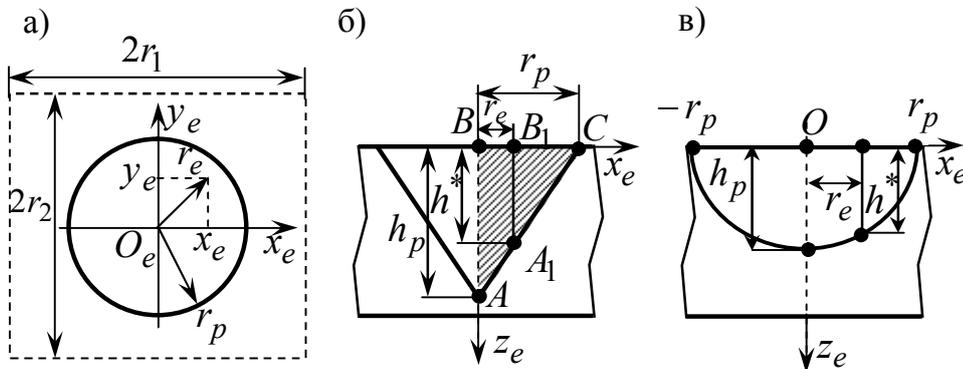


Рис. 6. К определению толщины смазочного слоя в ямке

$$h^* = \frac{(r_p - r_e) \cdot h_p}{r_p} \quad h^* = h_p - \frac{h_p}{r_p^2} x_e^2$$

$$h = \begin{cases} h_y, & \text{при } x \geq l_p \\ h_y + h^*, & \text{при } x_e^2 + y_e^2 < r_p^2 \text{ и при } 0 \leq x \leq l_p \end{cases} \quad (1)$$

Течение СМ рассматривали в прямоугольной системе координат  $Oxyz$  (ось  $y$  совпадает с осью вращения ротора). При выполнении численных исследований были приняты следующие допущения: режим движения СМ предполагается ламинарным; частицы СМ на границе с твердым телом имеют скорость соответствующую точке тела; движение пя-

ты в радиальном направлении не учитывается ( $U_r = 0$ ); давление по толщине СС принимается постоянным; гидродинамическая реакция СС направлена по нормали к поверхности пяты ( $R = R_y$ ). Вследствие симметрии задачи, определение полей давлений проводилось для одного сегмента подшипника, который полагался неподвижным и прямоугольной формы, тангенциальный размер сегмента  $L$  принимался равным дуге среднего радиуса, а ширина  $b = R_2 - R_1$  (рис. 4, в). Силы инерции СС не учитывались.

Поле гидродинамических давлений  $p(x, z)$  в СС находили интегрированием обобщенного уравнения Рейнольдса, которое записывали в безразмерном виде:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left( \frac{\bar{h}^{n+2}}{\bar{\mu}} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( \frac{\bar{h}^{n+2}}{\bar{\mu}} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right) = 6\bar{U} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} \quad (2)$$

и решали с учетом следующих граничных условий:

$$\bar{p}|_{\bar{z}=0} = \bar{p}|_{\bar{z}=b} = 0; \bar{p}|_{\bar{x}=0} = \bar{p}|_{\bar{x}=l_p} = \bar{p}_k; \bar{p} \geq 0. \quad (3)$$

Здесь  $n$  – степень неньютоновского поведения СМ;  $\bar{\mu} = \mu/\mu_1$  – коэффициент динамической вязкости неньютоновской жидкости, где  $\mu$  определяли по формуле:

$$\mu(T, p, \dot{\gamma}) = \begin{cases} \mu_1 \cdot C_1 e^{(C_2/(T+C_3)) + \beta(T) \cdot p}, & 1 \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_1; \\ (I_2)^{(n(T)-1)/2} \cdot C_1 e^{(C_2/(T+C_3)) + \beta(T) \cdot p}, & \dot{\gamma}_1 \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_2; \dot{\gamma} = \sqrt{I_2}, \\ \mu_2 \cdot C_1 e^{(C_2/(T+C_3)) + \beta(T) \cdot p}, & \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_2, \end{cases}$$

где  $I_2$  – второй инвариант скоростей сдвига;  $T$  – расчетная температура СМ;  $\beta$  – пьезокоэффициент вязкости;  $\mu_1, \mu_2$  – первая и вторая ньютоновская вязкости, соответствующие низким и высоким скоростям сдвига;  $C_1, C_2, C_3$  – константы СМ;  $\gamma_1, \gamma_2$  – эмпирические пороговые значения скоростей сдвига.

Для решения уравнения (2) был применен метод конечных разностей, для чего была введена равномерная сеточная область на поверхности одного сегмента с шагами  $\Delta \bar{x}, \Delta \bar{z}$  по осям  $x$  и  $z$  соответственно.

Уравнение (2) в дивергентной форме имеет вид:

$$\frac{\partial B}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial C}{\partial \bar{z}} = 0. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4) по элементарной площадке  $S_{ij}$  и переходя в его левой части к контурному интегралу, получена разностная консервативная схема:

$$\left( B_{i+\frac{1}{2},j} - B_{i-\frac{1}{2},j} \right) \frac{1}{\Delta \bar{x}} + \left( C_{i,j+\frac{1}{2}} - C_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \frac{1}{\Delta \bar{z}} = 0. \quad (5)$$

Систему (5) записывали в виде системы линейных алгебраических уравнений:

$$A_{ij} \bar{p}_{i,j+1} + B_{ij} \bar{p}_{i,j} + C_{ij} \bar{p}_{i,j-1} + F_{ij} \bar{p}_{i+1,j} + E_{ij} \bar{p}_{i-1,j} = D_{ij}. \quad (6)$$

При этом выполняется условие диагонального преобладания коэффициентов.

Для решения задачи о давлении использовали итерационный алгоритм Зейделя, который был реализован по схеме:

$$\bar{p}_{ij}^{(\rho+1)} = \frac{1}{B_{ij}} (D_{ij} - A_{ij} \bar{p}_{i,j+1}^{(\rho)} - C_{ij} \bar{p}_{i,j-1}^{(\rho)} - F_{ij} \bar{p}_{i+1,j}^{(\rho)} - E_{ij} \bar{p}_{i-1,j}^{(\rho)}),$$

где  $\rho$  – номер итерации.

Итерационный процесс поиска эпюры давления прерывали при выполнении условия

$$\text{сходимости: } \left| \frac{\sum \sum p_{ij}^{\rho+1} - \sum \sum p_{ij}^{\rho}}{\sum \sum p_{ij}^{\rho}} \right| \leq \varepsilon .$$

При решении уравнения (2) применен многосеточный метод, позволяющий ускорить итерационный процесс сходимости и повысить точность решения. Для этого область трения  $S_{ij}$  аппроксимировали последовательностью прямоугольных сеток  $S^1, S^2, \dots, S^{ns}$ , где  $ns$  – количество сеток (уровней дискретизации). Количество узлов на первой (самой грубой) сетке ( $ns = 1$ ) определяли исходя из того, чтобы один из узлов сетки был совмещен с серединой ямки, шаги сетки по осям  $x$  и  $z$  равнялись соответственно  $\Delta \bar{x} = 2\bar{r}_1$ ,  $\Delta \bar{z} = 2\bar{r}_2$  (см. рис. 4, в). При достижении сходимости по давлению на грубой сетке шаг по  $x$  и по  $z$  делим пополам и повторяем численное решение на более мелкой сетке.

С целью сокращения времени расчетов была проведена оценка критерия сходимости  $\varepsilon$  и степени дискретизации поверхности  $ns$ . Исследования проводили на примере расчета НС упорного ПС ротора турбокомпрессора ТКР-8,5С. В ходе выполнения расчетов было установлено, что для описания с приемлемой точностью геометрии поверхности трения и процессов, происходящих в СС упорного ПС, а также для снижения времени расчетов достаточно использовать следующие параметры многосеточного алгоритма:  $ns = 3$ ,  $\varepsilon = 10^{-5}$ . При этом количество сеточных узлов составило  $3814 \times 2617$ . Использование выбранных параметров многосеточного алгоритма позволяет уменьшить количество итераций более, чем в 4 раза.

Оценка эффективности используемого многосеточного алгоритма с последовательным переходом от крупной сетки к мелкой проводилась сравнением количества итераций с численной итерационной процедурой интегрирования уравнения Рейнольдса на одной сетке. Различие результатов не превысило 0,45 %, при этом количество итераций на многосеточном методе снижается в 2,7 раза.

**В третьей главе** представлены экспериментальные исследования влияния лазерного текстурирования поверхности сегментов упорного подшипника скольжения на его НС и коэффициент трения.

Эксперимент проводился автором в лаборатории «Триботехника» израильского технологического института «Технион» (г. Хайфа).

Общая схема экспериментального комплекса приведена на рис. 7. Вращение от электродвигателя передается на ротор 5. Подшипниковый узел состоит из пяты 3 и подпятника 1, поверхности которых параллельны. Для измерения толщины СС в упорный ПС установлен датчик 4. Пята вращается с заданной скоростью вместе с ротором. Подпятник жестко зафиксирован в корпусе стенда. Стенки защитного корпуса выполнены из оргстекла.

Осевую нагрузку  $F$  обеспечивают тарированные грузы. На конце рычага с противоположной стороны от груза установлен датчик для измерения усилия сжатия 8, который позволяет контролировать прилагаемую нагрузку. Смазка поступает в корпус упорного подшипника по трубопроводу из бака и растекается по поверхности трения подшипника.

Для измерения момента вязкого трения в эксперименте использовали датчик момента 7. Термопара ТХК 2, прилегающая к внешней кромке подпятника, позволяет контролировать температуру СМ. Все данные с датчиков выводились на многоканальный кон-

троллер ВЕ 3200. Для обработки экспериментальных данных использовалось программное обеспечение «Perception».

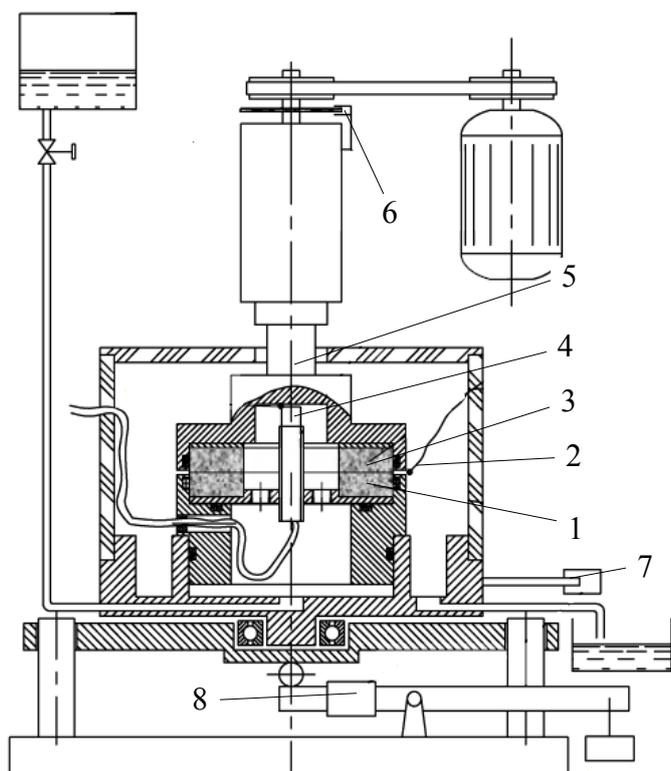


Рис. 7. Общая схема экспериментального стенда

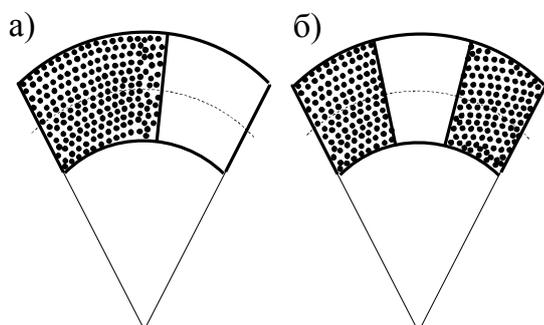


Рис. 8. Схема сегмента с ЛТ:

а) «одностороннее» ЛТ;

б) «двустороннее» ЛТ.

Использованные в эксперименте пяты и подпятник выполнены в виде дисков из карбида кремния (SiC), толщиной 10 мм, с наружным диаметром 85 мм и внутренним 40 мм. Подпятник разделен радиальными канавками на шесть сегментов, на поверхности которых нанесено ЛТ. Исследовано 3 образца: образец № 1 с «односторонним» текстурированием, когда обрабатывалась только одна часть поверхности сегментов со стороны входа в них по вращению пяты (рис. 8, а); образец № 2 с «двусторонним» текстурированием, у которого были обработаны две части поверхности сегмента со стороны входа и выхода (рис. 8, б); образец № 3 без лазерного текстурирования поверхности.

После обработки параметры ЛТ подпятников были измерены на электронном микроскопе Veeco «Wyko NT 1100»: образец № 1,  $h_p = 6,3$  мкм,  $r_p = 34,5$  мкм,  $S_p = 0,68$ ,  $\alpha = 74\%$ ; образец № 2,  $h_p = 6,5$  мкм,  $r_p = 36,1$  мкм,  $S_p = 0,64$ ,  $\alpha = 74\%$ .

Во время эксперимента осевая нагрузка  $F$  варьировалась с шагом 40 Н от 160 Н до 460 Н, время одного шага 60 секунд. Нижний и верхний предел нагрузки ограничивался возможностями экспериментальной установки. На каждом шаге фиксировалась толщина смазочного слоя  $h$ , мкм, момент вязкого трения  $M_{mp}$ , Н·м и температура

$T$ , °С. Эксперимент проводили при двух скоростях вращения ротора: 1500 и 3000 мин<sup>-1</sup>. Анализ результатов эксперимента показал, что упорный ПС с текстурированными поверхностями подпятников работает во всем диапазоне нагрузок лучше, чем ПС с гладкой поверхностью сегментов: толщина СС больше, а значения коэффициента в 2,5 – 3 раз ниже. С увеличением скорости коэффициент вязкого трения возрастает на 18 % для текстурированных ПС и на 10 % для нетекстурированного ПС.

Адекватность разработанной математической модели была проведена путем сравнения расчетных данных и результатов собственного эксперимента (первый этап, рис. 9), а также результатов эксперимента иностранных авторов (второй этап, рис. 10). На графиках (рис. 9) видно хорошее качественное и количественное совпадение результатов. Максимальное расхождение данных наблюдается при

$\omega = 3000 \text{ мин}^{-1}$  и не превышает в процентном соотношении для толщины СС – 11 % при  $F = 300 \text{ Н}$ , а для коэффициента трения – 15 % при  $F = 450 \text{ Н}$ .

Аналогичные расчеты были выполнены для упорного ПС, параметры обработки которого представлены в работе Henry Yann «Experimental investigation on hydrodynamic parallel surface thrust bearings with textured pads»<sup>1</sup>.

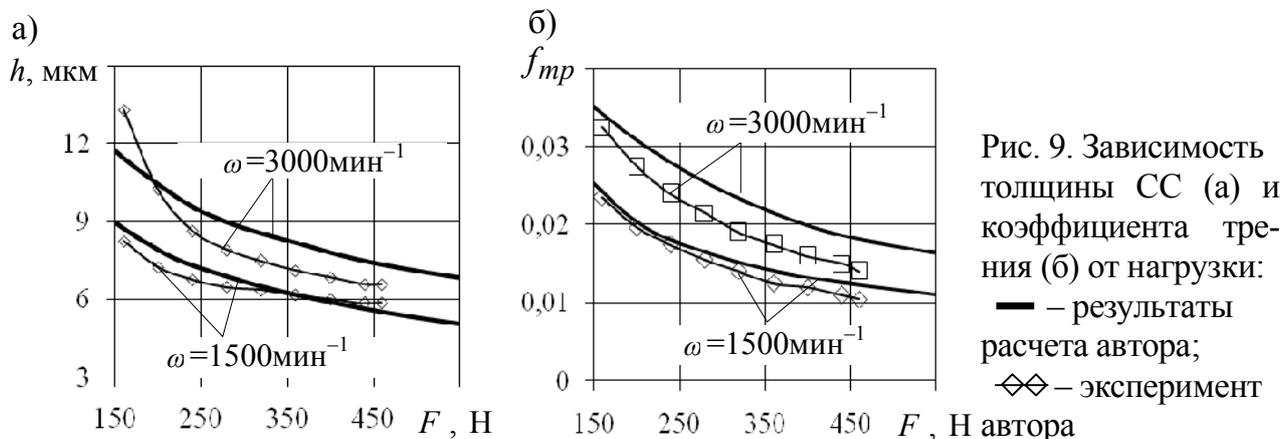


Рис. 9. Зависимость толщины СС (а) и коэффициента трения (б) от нагрузки: — результаты расчета автора;  $\diamond$  — эксперимент

Из рис. 10 видно качественное совпадение результатов расчета автора с экспериментальными данными зарубежных ученых. Среднее арифметическое отклонение результатов не превышает 10 %.

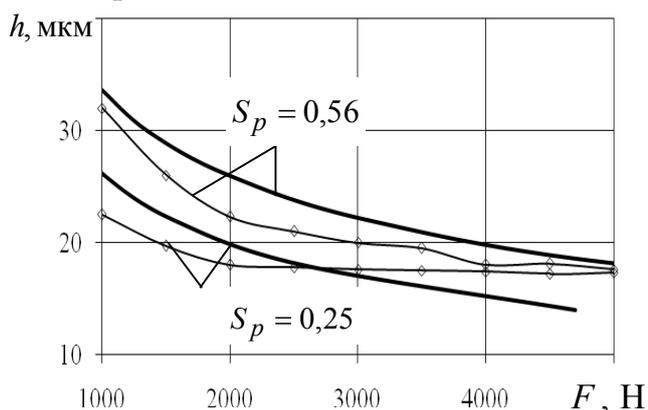


Рис. 10. Зависимость толщины СС от нагрузки (— результаты расчета автора;  $\diamond$  — эксперимент Henry Yann)

На основе сравнения экспериментальных и расчетных данных (рис. 9, 10) можно сделать вывод, что разработанная математическая модель и реализованное на ее основе программное обеспечение позволяют с достаточной степенью точности производить численные исследования ГМХ упорных сегментных ПС с ЛТ несущей поверхности.

**В четвертой главе** представлены результаты параметрических исследований, направленных на оценку влияния параметров ЛТ на НС упорного ПС. Исследования проводили на примере расчета

ГМХ упорного ПС ротора турбокомпрессора ТКР-8,5С. Параметры текстурирования варьировались в следующих пределах:  $0 \leq \alpha \leq 1$ ;  $5 < h_p \leq 30 \text{ мкм}$ ;  $30 \leq r_p \leq 110 \text{ мкм}$ ;  $0,2 \leq S_p \leq 0,785$ . Максимальная плотность распределения ямок  $S_p = 0,785$  определялась при отсутствии наложения ямок друг на друга.

На рис. 11 представлена зависимость НС от доли текстурированной части сегмента  $\alpha$  при различных значениях плотности распределения ямок  $S_p$ . В ходе расчетных исследований установлено, что с увеличением  $S_p$  НС увеличивается и достигает максимума при  $S_p = 0,6 - 0,785$ . При этом значения текстурированной части сегмента лежат в пределах  $\alpha = 0,5 - 0,7$ .

<sup>1</sup> World Tribology Congress 2013. Torino, Italy, September 8 – 13, 2013. – P. 1 – 4.

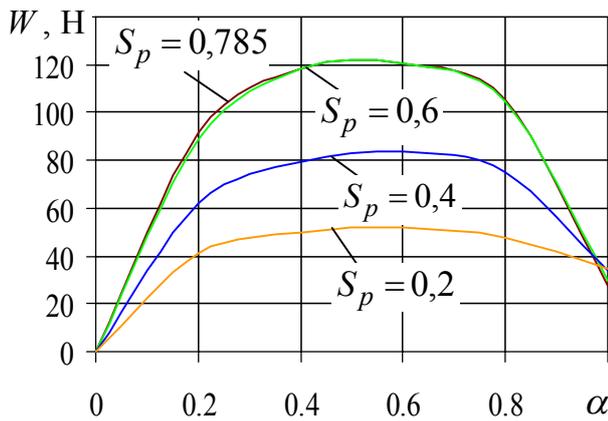


Рис. 11. Зависимость НС от  $\alpha$  при различных  $S_p$

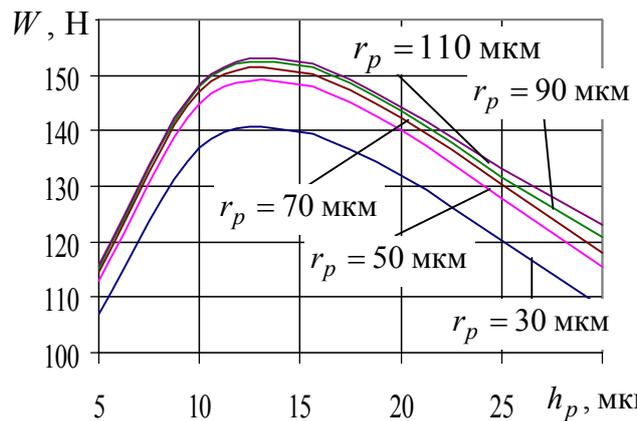


Рис. 12. Зависимость НС от  $h_p$  при различных  $r_p$

На следующем этапе численного исследования определялось влияние на НС глубины  $h_p$  и радиуса  $r_p$  ямки (рис. 12).

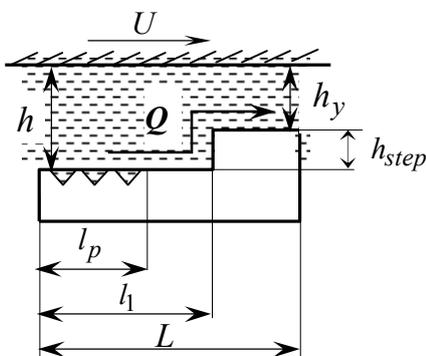


Рис. 13. Схема сегмента – «Ступенька Рэля» с ЛТ

Значительного влияния радиус ямки на НС не оказывает (при увеличении  $r_p$  от 30 до 110 мкм НС увеличилась от 3,9 до 6,4 %). При изменении глубины ямки от 5 до 15 мкм происходит увеличение НС на 13 %. Из рис. 12 видно, что для данного ПС существует оптимальное значение  $h_p$  и дальнейшее его увеличение приводит к снижению НС.

В ходе численных исследований автором было предложено новое техническое решение, сочетающее преимущества «ступеньки Рэля» и ЛТ поверхности трения. Принципиальная схема нового сегмента представлена на рис. 13.

Для оптимизации процесса численных исследований по поиску наилучших параметров обработки сегментов УП в форме «ступеньки Рэля» и нанесением на его части поверхности лазерного текстурирования был использован метод «Крутого восхождения», который основывается на результатах, полученных методом дробных реплик. Критерием оптимальности принята функция отклика:  $W$  – несущая способность.

В качестве влияющих факторов были выбраны следующие параметры:  $x_1 = h_p/r_p$ ;  $x_2 = S_p$ ;  $x_3 = \alpha$ ;  $x_4 = l_1/L$ ;  $x_5 = h_{step}/h_y$ . Для сокращения числа численных экспериментов был использован план типа  $2^{5-2}$ . После получения коэффициентов регрессии и проверки их значимости было составлено адекватное уравнение регрессии для целевой функции:

$$W = 74,83 + 2,117 \frac{h_p}{r_p} - 59,08 S_p - 56,23 \alpha + 0,64 \frac{l_1}{L} - 0,315 \frac{h_{step}}{h_y}. \quad (7)$$

Полученное уравнение регрессии (7) позволило рекомендовать основные геометрические параметры профиля несущей поверхности скольжения (глубина микроямки, радиус ямки, плотность распределения ямок, площадь обработанной поверхности сегмента, длина и высота «ступеньки Рэля»), обеспечивающие повышение несущей способности на 53 % по сравнению с частичным лазерным текстурированием плоской

поверхности при сохранении заданного ресурса. Преимущество разработанной конструкции было продемонстрировано на примере сравнения результатов расчета НС и максимального давления для четырех форм сегментов: I – лазерное текстурирование поверхности, II – наклонная поверхность, III – «ступенька Рэлея», IV – «ступенька Рэлея» с лазерным текстурированием поверхности (таблица).

Таблица

Зависимость максимального давления и несущей способности от формы поверхности сегментов упорного ПС

Характеристики	Конструкция подпятника			
	I	II	III	IV
$P_{\max} / P_{\max IV}$	0,62	0,66	0,99	1
$W / W_{IV}$	0,47	0,59	0,60	1

Сравнение результатов показало, что предложенное техническое решение позволяет повысить НС упорного подшипника скольжения ТКР-8,5С до 40% по сравнению со «Ступенькой Рэлея» и на 53% по сравнению с частичным текстурированием гладкой поверхности.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложена математическая модель процессов течения неньютоновской жидкости в смазочном слое упорного гидродинамического сегментного подшипника скольжения, позволяющая учитывать макро- и микропрофиль несущей поверхности подпятника: «ступеньку Рэлея», наклон поверхности, частичное и полное лазерное текстурирование.

2. Полученные зависимости несущей способности и гидромеханических характеристик трибосопряжения, смазываемого неньютоновской жидкостью, от параметров лазерного текстурирования поверхностей трения с применением метода оптимизации позволяют прогнозировать работоспособность упорного ПС турбокомпрессора.

3. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение для расчета гидродинамического упорного сегментного подшипника скольжения турбокомпрессора, с учетом неньютоновских свойств смазочного материала, позволяет проводить исследования влияния параметров макро- и микрогеометрии сегментов подпятника в широком диапазоне их изменения на несущую способность и гидромеханические характеристики.

4. Проведенные экспериментальные исследования влияния параметров лазерного текстурирования на несущую способность и на коэффициент трения подтвердили адекватность математической модели. Результаты показали количественное и качественное совпадение характеристик: максимальное расхождение данных наблюдается при частоте вращения ротора  $\omega = 3000 \text{ мин}^{-1}$  и не превышает в процентном соотношении: для толщины смазочного слоя – 11 % при нагрузке  $F = 300 \text{ Н}$ , а для коэффициента трения – 15 % при нагрузке  $F = 450 \text{ Н}$ .

5. Численные исследования позволили определить параметры лазерного текстурирования поверхности и их наилучшие значения, оказывающие наибольшее влияние на несущую способность и гидромеханические характеристики упорного подшипника. Так было установлено, что можно увеличить несущую способность трибосопряжения, если значения текстурированной части сегмента лежат в пределах  $\alpha = 0,5 - 0,7$ ; плотность распределения ямок –  $S_p = 0,6 - 0,785$ ; глубина ямки – 15 мкм.

6. На основе выполненных исследований разработано техническое решение, защищенное патентом на полезную модель «Упорный гидродинамический подшипник скольже-

ния», которое сочетает в себе преимущества обработки поверхности с помощью лазерного текстурирования и макрогеометрии сегмента в форме «ступеньки Рэлея».

7. Проведенные компьютерные параметрические исследования и оптимизация гидродинамического упорного подшипника для турбокомпрессора ТКР-8,5С, производства ООО НПО «Турботехника» г. Протвино, позволили рекомендовать основные геометрические параметры профиля несущей поверхности скольжения (глубина микроямки, радиус ямки, плотность распределения ямок, площадь обработанной поверхности сегмента, длина и высота «ступеньки Рэлея»), обеспечивающие повышение несущей способности на 53 % по сравнению с частичным лазерным текстурированием плоской поверхности при сохранении заданного ресурса.

8. Перспективой дальнейшей разработки темы является использование созданных моделей, методического, алгоритмического и программного обеспечения для исследования гидродинамических трибосопряжений поршневых и роторных машин с различной, в том числе, нерегулярной макрогеометрией поверхностей трения.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ, В РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ИЗДАНИЯХ

1. **Чернейко, С.В.** Экспериментальная оценка характеристик упорного гидродинамического подшипника с параллельными поверхностями / **С.В. Чернейко**, А.М. Ципенюк // Двигателестроение. – 2014. – №3 (257). – С. 29–33.

2. Пути повышения несущей способности гидромеханических трибосопряжений текстурированием поверхностей трения / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, **С.В. Чернейко** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2014. – Т.14, № 3. – С. 16–21.

3. Расчет несущей способности и коэффициента трения упорных подшипников скольжения с лазерным текстурированием несущей поверхности / Ю.В. Рождественский, А.К. Бояршинова, Е.А. Задорожная, **С.В. Чернейко** // Вестник ОГУ. – 2014. – № 10 (171). – С. 169–176.

4. Модель расчета упорного подшипника скольжения с лазерным текстурированием несущей поверхности / Ю.В. Рождественский, Е.А. Задорожная, **С.В. Чернейко** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 5–23.

5. Программный комплекс для расчета гидромеханических характеристик секторного упорного гидродинамического подшипника с различной обработкой поверхности «Секторный подпятник» / А.К. Бояршинова, **С.В. Чернейко** // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2013617906 от 27.08.2013.

6. Программный комплекс для расчета характеристик упорного гидродинамического сегментного «подшипника Рэлея» с лазерным текстурированием поверхности «Секторный подпятник-II» / А.К. Бояршинова, **С.В. Чернейко** // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2014614568 от 29.04.2014.

7. Патент на полезную модель «Упорный гидродинамический подшипник скольжения» / А.К. Бояршинова, **С.В. Чернейко** // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 146643 от 16.09.2014.