

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ

А.П. Маслов, к.т.н.; ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» ГСКБД, г. Челябинск
 Е.А. Задорожная, к.т.н., доцент; ЮУрГУ, кафедра АТ и сервис, г. Челябинск
 Р.Д. Еникеев, д.т.н., проф., А.А. Черноусов, к.т.н., доцент
 УГАТУ, кафедра ДВС, г. Уфа

Выбор геометрических размеров базовых деталей двигателя обычно выполняют на основе маркетинговых исследований сравнительного анализа и выбора прототипа, соответствующего основным техническим и эксплуатационным требованиям. Довольно часто этот выбор продиктован субъективным мнением конструкторов, направленным на получение необходимого уровня мощности, обеспечение минимальных потерь на трение и затрат на производство. При этом важным фактором является оценка возможности производства, основанная на субъективном мнении технологов и производственников. В статье предложена методология формирования геометрических размеров основных деталей двигателя на базе расчетно-теоретических методов, объединенных в информационное пространство.

Достижение оптимальных значений технических параметров двигателя во многом обусловлено обоснованным выбором размеров цилиндра (диаметра и хода поршня), который является одним из критериев оценки напряженности деталей ЦПГ и КШМ. Анализ технических параметров современных двигателей показывает, что их литровая мощность достигает 25–40 кВт/л, при которой имеет место достаточно высокий уровень тепловой напряженности базовых деталей. Очевидно, что дальнейшее повышение значений этого параметра будет сопровождаться еще большим ростом термической напряженности элементов и деталей, что приводит к необходимости применения эффективных теплозащитных и антифрикционных покрытий, использования современных высокопрочных материалов и смазочных масел [1].

Цель данной статьи — рассмотреть и переосмыслить некоторые тривиальные методы проектирования двигателей с использованием системного подхода при формировании алгоритма проектирования ДВС, а также логики его построения в рамках располагаемого информационного пространства. Кроме этого, предполагается даль-

Если вы делаете все так, как привыкли, то и получите то, что обычно получаете.

13-й принцип «Зеленой химии» д.т.х Е.С. Локтевой, д.х.н., проф., В.В. Лунина, МГУ

нейшее формирование информационного пространства, с помощью которого возможно использование опыта и разработок различных научных коллективов, находящихся в информационном поле, что позволит систематизировать их опыт и целенаправленно его использовать. Предлагаемый системный подход позволяет оценить все аспекты производства виртуального двигателя на стадиях CAE, CAD, CAM с условием обеспечения обратной связи для оценки возможности исключения образования опасных и вредных продуктов при проектировании, производстве и утилизации двигателя.

По мнению авторов, этот подход согласуется с 11-м принципом «Зеленой химии», который формулируется следующим образом: «Нужно развивать аналитические методики, чтобы можно было следить в реальном времени за образованием опасных продуктов» [2]. Таким образом, решение задачи формирования конструктивных параметров базовых элементов двигателей и создание самого двигателя на основе CALS/ИПИ технологий позволит в рамках исследований виртуального объекта проанализировать каждый этап его производства и эксплуатации в реальном масштабе времени. Обоснованный выбор геометрических размеров основных деталей двигателя определяет стратегию формирования его конструкции на момент создания и перспективу.

Геометрические размеры цилиндра (диаметр и ход поршня) формируют виртуальный облик двигателя и его базовых деталей, таких как блок-картер и коленчатый вал. Как известно, после начала производства изменение конструкции этих деталей двигателя связано со значительными временными и производственными затратами.

Формирование значений диаметра цилиндра и хода поршня

Для решения задачи обоснованного определения значений диаметра цилиндра и хода пор-

шня необходимо дать ответы на следующие вопросы:

- какие факторы влияют на выбор размеров диаметра цилиндра;
- какие факторы влияют на выбор размера хода поршня.

К таким факторам можно отнести значение максимального и среднего эффективного давления в цилиндре, величину теплового потока, воздействующего на поверхность головки поршня, а также теплофизические и прочностные свойства материала поршня и цилиндра, из которого они изготавливаются. Очевидно, что величина теплового потока, воздействующего на поршень, будет обратно пропорциональна диаметру огневой поверхности поршня. То есть чем больше диаметр этой поверхности, тем меньше величина его удельной тепловой напряженности, следовательно, целесообразно диаметр поршня увеличивать. Кроме этого, необходимо учитывать наличие способов тепловой защиты поверхности поршня и/или на обеспечение его охлаждения. В этом случае чем выше будет эффективность теплоотвода, тем меньший диаметр цилиндра обеспечит получение заданной мощности.

Еще одним важным аспектом при определении и выборе геометрических размеров деталей ЦПГ являются технологические возможности и экономические показатели их производства. К ним относятся наличие специальных станков для механической обработки деталей, необходимость организации их термообработки, а также технология контроля качества сборки. То есть для прогноза показателей стоимости, прочности и надежности необходимо применять сопряженные математические модели, обеспечивающие достоверность показателей процессов (во всех указанных выше аспектах), что в принципе дает ответы на поставленные вопросы.

В связи с этим для расчета параметров деталей, формирующих их геометрический облик, может быть использован, например пакет прикладных программ ALLBEA, разработанный для численного (компьютерного) моделирования процессов в сложных технических системах [3, 4]. Данный пакет содержит, в частности, прикладные библиотеки *gasdun* (газообмен и процессы в рабочей камере ДВС) и *mesh* («динамика и трибология» — элементарная динамика, кинематика и динамика ДВС, модели трения и изнашивания), которые можно дополнить и использовать в связке с другими программами.

Для увязки с показателями газообмена и рабочего процесса всех параметров, определяющих объем двигателя, модули из библиотеки *gasdun* используются в расчете совместно с моделями библиотек *mesh* пакета ALLBEA. Для оптимизации

геометрических параметров, характеризующих, например, литровый объем двигателя (диаметр цилиндра и ход поршня), возможно использование эвристических методов программирования, которые предполагают введение в задачу ограничений, основанных на некоторых рациональных подходах. В этом случае решение задачи разбивается на несколько этапов:

- на первом этапе, по результатам маркетинговых исследований, выбирается уровень литровой мощности и формируется блок данных, необходимый для выполнения расчетных исследований по определению параметров рабочего цикла двигателя;

- на втором этапе, для заданной заказчиком мощности, при выбранном значении объема двигателя выполняются расчетные исследования по определению теплового и напряженно-деформированного состояния деталей;

- на третьем этапе, по результатам исследований, определяется диаметр поршня с учетом перспективного уровня форсирования и реализации путей возможного снижения теплонапряженности поршня, а также комплексной оценки всех вышеизложенных влияющих факторов.

Формирование формы и размеров камеры сгорания

Еще один фактор, влияющий на тепловое и напряженно-деформированное состояние поршня, — организация процесса сгорания топлива в цилиндре, от эффективности которого зависят экономические и экологические параметры, а также его надежность и долговечность. Для решения задачи по организации процесса сгорания необходимо ответить на следующие вопросы:

- какие факторы влияют на организацию рабочего процесса;

- какие параметры рабочего процесса влияют на его эффективность и характеристики этих параметров;

- какая форма камеры сгорания оптимальна;

- какие параметры топливной струи необходимы для организации процесса;

- какие параметры воздухообеспечения и продувки обеспечат необходимые условия для организации процесса.

Математические модели для описания рабочего процесса могут быть реализованы, например, в прикладных модулях для пакета ALLBEA (специалистами УГАТУ, г. Уфа, и другими разработчиками). Наличие ряда необходимых (основных и вспомогательных) моделей процесса в камере сгорания двигателя в пакете ALLBEA (или интеграция с готовыми моделями для расчета показателей рабочего процесса из других пакетов) позволит ответить на поставленные вопросы и

подготовить информацию для геометрического построения формы камеры сгорания. Отработанные методики моделирования и программное обеспечение будут применимы для моделирования и на дальнейших этапах расчетных исследований.

Таким образом, располагаемое информационное пространство позволяет обоснованно определять не только диаметр цилиндра и ход поршня, но и количество цилиндров, необходимых для получения заданной мощности, а также сформировать конструкцию и количество поршневых колец для герметизации камеры сгорания и снижения расхода масла на угар. При определении геометрических параметров камеры сгорания возможно использование таких отечественных программ, как, например, «Дизель РК1», «Дизель РК2» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Следующий фактор, который необходимо учитывать при определении диаметра цилиндра, — уровень механических потерь в сопряжениях уплотняющей части поршня «поршневые кольца—цилиндр». Как известно, поршневые кольца подвержены значительному силовому и температурному воздействию от газовых сил и сил трения. Конструкция поршневого комплекта должна обеспечить герметизацию камеры сгорания, а также способствовать снижению температуры уплотняющей части поршня. Герметизация камеры сгорания осуществляется за счет более полного прилегания торцевой поверхности кольца к стенке цилиндра. При этом чем больше диаметр цилиндра, тем выше потери на трение в трибосопряжениях «цилиндр—поршневые кольца—поршень», соответственно целесообразно диаметр цилиндра уменьшать. Кроме этого, при формировании облика поршневого кольца необходимым условием является обеспечение торцевого зазора в замке с учетом тепловой деформации кольца и стенки цилиндра на всех режимах работы двигателя.

Формирование облика частей поршня возможно на основе использования комплекса программ разработки ЮУрГУ: «Орбита-поршень» Версия 1.0 № 950326 [5], «Орбита-поршень 2» «Комплекс программ анализа динамики трибосопряжения "поршень—цилиндр"» [6], «Орбита-поршень 3» «Комплекс программ для исследования трибосопряжения "поршень—цилиндр"» [7], «Поршень-КОНТАКТ» [8], позволяющих выполнять анализ динамики трибосопряжений «поршень—цилиндр» с учетом оптимизации геометрических параметров профиля образующей поверхности юбки поршня, а также профиля рабочей поверхности поршневых колец с использованием программ оптимизации на основе Парето (Парето—оптимальные решения) [9].

Формирование облика коленчатого вала и его элементов

В формировании облика двигателя существенная роль отводится формированию облика коленчатого вала с учетом влияния на условия его работы крутильных колебаний, уравниваемости, прочностного и гидромеханического анализа сопряжений.

Определение и оптимизация схемы расположения элементов коленчатого вала также относится к стратегическим решениям при формировании конструкции двигателя на момент его создания и на перспективу.

К факторам, влияющим на формирование конструкции коленчатого вала двигателя можно отнести: условия, при которых обеспечивается равномерность хода и уравнированность двигателя, равномерное нагружение элементов коленчатого вала и наименьшее напряжение от крутильных и изгибных колебаний.

Кроме этого, необходимым элементом обеспечения работоспособности двигателя, является согласование системы смазывания с трибомеханическими характеристиками подшипников скольжения или качения. На этапе формирования системы смазывания целесообразно создать электроаналоговую модель подвода масла к поверхностям трибосопряжений, а в дальнейшем воспользоваться соответствующей программой гидравлического расчета «Системы автоматизированного проектирования систем смазки «Смазка», версия 1.0 [10].

Так как вопросы уравнивания двигателей и снижения крутильных колебаний решены давно и достаточно успешно, их решение целесообразно выполнять с использованием доступных инструментов в рамках информационного пространства.

Для решения задачи по обоснованному определению размеров элементов коленчатого вала необходимо ответить на следующие вопросы:

- какие факторы влияют на формирование размера радиуса кривошипа;
- какие факторы влияют на формирование размера диаметра шеек коленчатого вала;
- какие факторы влияют на формирование размера длины шейки коленчатого вала;
- какие факторы влияют на формирование геометрии щеки и противовеса коленчатого вала.

Как известно, ход поршня определяется радиусом кривошипа, а размеры шеек частотой вращения коленчатого вала двигателя. При этом необходимо учитывать, что значение хода поршня будет зависеть от диаметра цилиндра как функции литрового объема двигателя. В то же время размер кривошипа формирует геометрические пара-

метры картера и поддона, значения которых обычно определяют массогабаритные параметры двигателя. Таким образом, последовательное формирование связанных задач позволяет конструировать схему информационного пространства.

Геометрические размеры шеек коленчатого вала в основном формируются исходя из необходимости обеспечения прочностных параметров с учетом действия знакопеременных сил и крутильных колебаний. При этом геометрические параметры и расположение противовесов также закладываются в конструкцию коленчатого вала и формируют его облик.

Важным параметром при формировании конструкции кривошипа в целях обеспечения оптимальных гидромеханических параметров подшипников скольжения является выбор соотношений длины и диаметра шейки коленчатого вала, который основывается на решении взаимосвязанных задач: динамики шипа на смазочном слое под действием внешней нагрузки и реакции смазочного слоя, а также гидродинамической теории смазки для определения распределения давлений и температуры в слое смазочной жидкости. Расчеты геометрических размеров могут быть выполнены в термогидродинамической (неизотермической) постановке задачи с использованием программы «ТЕМПО», версия 1.0 «Программа гидродинамического и теплового расчета сложнонагруженных опор скольжения» [11], «ТЕМПО-2» «Программа теплового расчета сложнонагруженных опор жидкостного трения в термогидродинамической (неизотермической) постановке» [12].

Исходными данными для определения таких конструктивных параметров коленчатого вала, как диаметр и ширина шеек, номинальный диаметральный зазор в подшипнике, диаметр маслоподводящего отверстия на поверхности шейки, а также начальный угол расположения маслоподводящего отверстия, служат результаты расчетных исследований рабочего процесса двигателя, а также кинематики и динамики КШМ. Реализация расчетных исследований, позволяющих сформировать облик коленчатого вала, базируется на применении комплекса программ, таких как «Программа исследований характеристик динамически нагруженных трибосопряжений с учетом процессов теплообмена в смазочных слоях и граничных режимов трения», «Граничный слой» [13] и «Ротор» «Программа гидродинамического расчета опор скольжения многоопорных тяжело нагруженных роторов» [14].

Оценка возможности применения и рекомендации по использованию синтетических и полусинтетических масел, а также смазочных мате-

риалов с большим количеством присадок можно отнести к неньютоновским маслам, поэтому для расчета гидромеханических характеристик узлов трения смазываемых такими маслами может быть использован комплекс программ «Неньютон» («Комплекс программ для исследования работы сложнонагруженных опор трения, работающих на неньютоновских маслах») [15], а также «Неньютон-П» («Комплекс программ анализа динамики и гидромеханических характеристик подшипников скольжения, работающих на неньютоновских маслах») [16].

Определение геометрических параметров трибосопряжений при возникновении условий с граничным режимом трения может быть реализован с применением программы «Граничный слой» («Программа исследований характеристик динамически нагруженных трибосопряжений с учетом процессов теплообмена в смазочных слоях и граничных режимов трения») [13], позволяющей выполнять такой расчет с учетом процессов теплообмена.

Формирование облика поршневого пальца и шатуна

Следующим этапом формирования конструкции ЦПГ и КШМ двигателя является обоснование геометрических размеров поршневого пальца и шатуна.

Формирование диаметра поршневого пальца определяется исходя из требований к его прочности. При этом необходимо принять во внимание, что диаметр пальца формируется с учетом значений диаметрального размера цилиндра, толщины стенок юбки поршня, значением размера между юбкой поршня и наружной поверхностью верхней головки шатуна, а также значением толщин головки шатуна. Толщина стенки верхней головки шатуна, в свою очередь, будет зависеть от действующих значений инерционных сил поршневого комплекта. Толщина стенки поршня формируется с учетом значений действующей нормальной силы, прочностных параметров выбранного материала юбки поршня и определяется действующими значениями напряжений от сил давления газов.

Длина поршневого пальца определяется с учетом диаметра цилиндра, а также конструктивных особенностей крепления пальца, ограничивающих его перемещение, от действия случайных сил вдоль бобышек поршня, возникающих вследствие несоосности и упругой деформации поверхностей.

Следующий этап формирования облика и размеров деталей ЦПГ — определение геометрических размеров сечения стенки верхней головки шатуна, которая формируется под действием инерционных сил поршневого комплекта ЦПГ.

При этом различная направленность и величины действующих газовых и инерционных сил определяют размеры верхней и нижней частей бобышек, а также размеры верхней и нижней головки шатуна.

Формирование конструкции и длины стержня шатуна складывается из необходимости обеспечения высоких прочностных свойств, а также оптимального соотношения длины шатуна к радиусу кривошипа.

Для оценки гидромеханических параметров смазочного слоя и формирования геометрических размеров верхней головки шатуна можно использовать программы расчета подшипников скольжения, описанные выше. Учитывая, что сопряжение работает в условиях, близких к граничному трению, наряду с программой «ТЕМПО-2» [12] целесообразно использовать программу «Граничный слой» [13].

Формирование нижней головки шатуна базируется на результатах прочностного анализа и предварительного выбора диаметра шатунной шейки.

Параметром, характеризующим размер нижней головки шатуна, является диаметр шатунной шейки, значение которого должны обеспечивать надежную работу сопряжения при воздействии крутильных и изгибных колебаний.

Лимитирующим фактором при определении длины и параметров сечения шатуна является обеспечение достаточной жесткости и прочности стержня шатуна для передачи усилия от газовых сил к шатунной шейке коленчатого вала.

Формирование критериев и условий оптимизации элементов и деталей двигателя

При создании виртуального облика двигателя существенная роль должна отводиться многофакторной оптимизации как одного из методов снижения расходов при организации работ по CAE, CAD, CAM. В этом случае важная роль отводится определению функции цели и системы ограничений для тех элементов двигателя, где эта оптимизация необходима.

В качестве примера критерием оптимизации такого параметра, как литровый объем двигателя, можно выбрать: удельный эффективный расход топлива g_e , уровень напряженно-деформированного и теплового состояний уплотняющей части поршня, выбросы с отработавшими газами NO_x ; CH_x ; CO .

Таким образом, пространство изменяющихся параметров для оптимизации диаметра цилиндра и хода поршня может быть представлено в виде восьмимерного вектора:

$$Q = (D_{\text{ц}}; S_{\text{п}}; g_e; G_{\text{т}}; T^{\circ}\text{C}; \text{NO}_x; \text{CN}_x; \text{CO}),$$

где $D_{\text{ц}}$ — диаметр цилиндра, $S_{\text{п}}$ — ход поршня, $G_{\text{т}}$ — расход топлива.

Указанные параметры определяются по результатам расчета рабочего цикла двигателя, а также расчета теплового и напряженно-деформированного состояния деталей камеры сгорания. Кроме этого, на значения варьируемых параметров g_e , $T^{\circ}\text{C}$ накладывается ряд дополнительных ограничений.

В этом случае функция цели может быть представлена в виде вектора функции качества $J(N_e; p_z; G_{\text{т}}; G_{\text{м}}) = \text{opt}$, тогда путь решения данной многокритериальной задачи состоит в выделении множества Парето и организации на нем поиска оптимального решения [9]. В процессе оптимизации должно обеспечиваться получение значений критериев вектор-функции:

$N_e = \text{sup}$ — наибольшее значение литровой мощности;

$p_z = \text{inf}$ — наименьшее значение максимального давления цикла;

$G_{\text{т}} = \text{inf}$ — наименьшее значение расхода топлива;

$G_{\text{м}} = \text{inf}$ — наименьшее значение расхода масла на угар.

Обычно такая задача формируется как задача векторной оптимизации. Проектирование реальных объектов с учетом многих критериев, как правило, носит характер эвристического итерационного процесса: исследователь рассматривает различные варианты модели, оценивает результаты, уточняет постановку задачи, снова решает и анализирует новые варианты. Этот процесс также целесообразно автоматизировать, что повысит быстродействие и качество системы и снизит влияние человеческого фактора. Программы по оптимизации смазочного слоя были разработаны в соответствии с материалами, представленными в работе [9].

Следующим этапом по упорядочиванию использования программ будет составление каталога и базы данных, обеспечивающих выполнение расчетных исследований и формирование результатов расчета в виде исходных данных для организации работ в CAD.

Анализ представленных материалов показывает, что в статье представлены не все методы и не описаны все программы, на которые еще можно сослаться при формировании конструкции тех или иных узлов и деталей.

В данной статье представлены лишь некоторые материалы только двух школ, инициаторов формирования информационного пространства. Это школа профессора Б.П. Рудого Уфимского авиационного университета и школа профессора В.Н. Прокопьева Южно-Уральского государственного университета, а также специалистов ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» ГСКБД. Авторы предлагают ведущим российским научным школам

присоединиться к формированию информационного пространства.

Литература

1. *Мацкерле Ю.* Современный экономичный автомобиль / пер. с чешск. В. Б. Иванова; под ред. А.Р. Бенедиктова. — М. : Машиностроение, 1987. — 320 с.

2. *P.T.Anastas, J.C.Warner.* Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press, New York, 1998. — P. 30.

3. *Еникеев Р.Д., Черноусов А.А.* Проектирование и реализация пакета прикладных программ для анализа и синтеза сложных технических объектов / Вестник УГАТУ. — 2012. — Т. 16, № 5 (50). — С. 60–68.

4. *Еникеев Р.Д., Черноусов А.А.* Программный пакет ALLBEA: задачи интеграции с информационной средой проектирования ДВС // Двигателестроение. — 2013. — № 2. — С. 37–40.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 950326. Пакет прикладных программ «Орбита-Поршень», версия 1.0/ В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, А.К. Бояршинова, Е.А. Задорожная, А.П. Маслов, Н.А. Хозенюк. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.09.1995.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2002611824. Комплекс программ анализа динамики трибосопряжения «поршень–цилиндр» «ОРБИТА-ПОРШЕНЬ-2», Ю.В. Рождественский, Г.И. Плешаков, А.П. Маслов, Е.А. Задорожная, Н.А. Хозенюк. Зарегистрировано российским агентством по патентам и товарным знакам 23.10.2002.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2005610094. Комплекс программ анализа динамики трибосопряжения «поршень–цилиндр» «ОРБИТА-ПОРШЕНЬ-3», Ю.В. Рождественский, Г.И. Плешаков, А.П. Маслов, Е.А. Задорожная, Н.А. Хозенюк. Зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам 11.01.2005.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661032. Программа расчета гидромеханических характеристик трибосопряжения «поршень–цилиндр» с учетом контактного взаимодействия поверхностей трения и изменения температуры смазочного слоя «Поршень–контакт», Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, Е.А. Задорожная, А.А. Дойкин, И.Г. Леванов. Зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам 05.12.2012.

9. *Жилинскас А., Шалтянис В.* Поиск оптимума: компьютер расширяет возможности / А. Жилинскас, В. Шалтянис. — М. : Наука, 1989. — 128 с.

10. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2002611898. Система автоматизированного проектирования систем смазки «Смазка», версия 1.0, И.С. Петров, К.И. Погодин, С.Р. Сиврикова, А.В. Шумилов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.11.2002.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2001610243. Программа гидродинамического и теплового расчета сложнонагруженных опор скольжения «ТЕМПО», версия 1.0, В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, В.Г. Караваев, Е.А. Задорожная, Н.А. Хозенюк. И др. Зарегистрировано российским агентством по патентам и товарным знакам 05.03.2001.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618908. Программа теплового расчета сложнонагруженных опор жидкостного трения в термогидродинамической (неизотермической) постановке «ТЕМПО-2», Е.А. Задорожная, В.Г. Караваев. Зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам 16.11.2011.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20126617386. Программа исследований характеристик динамически нагруженных трибосопряжений с учетом процессов теплообмена в смазочных слоях и граничных режимов трения. И.В. Мухортов, Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов, К.В. Гаврилов. Зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам 16.08.2012.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 980414. Программа гидродинамического расчета опор скольжения многоопорных тяжело нагруженных роторов «Ротор», В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, Е.А. Задорожная, Н.А. Хозенюк. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.07.1998.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2004611345. Комплекс программ для исследования работы сложнонагруженных опор трения, работающих на неньютоновских маслах «Неньютон», В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, А.К. Бояршинова, Е.А. Задорожная, И.В. Андрющенко. Зарегистрировано российским агентством по патентам и товарным знакам 01.06.2004.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007613507. Комплекс программ анализа динамики и гидромеханических характеристик подшипников скольжения, работающих на неньютоновских маслах «Неньютон-II», В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, А.К. Бояршинова, Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов. Зарегистрировано российским агентством по патентам и товарным знакам 20.06.2007.