

УДК 621.436

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТУПЕНЕЙ ТУРБОМАШИН ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ КОМБИНИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

А. А. ЧЕРНОУСОВ¹, Т. И. ТЕРЕГУЛОВ²

¹andrei.chernousov@mail.ru, ²teregulov@inbox.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 4 марта 2014 г.

Аннотация. Проанализированы требования к моделям и процедурам, представляющим характеристики лопаточных машин в потоке рабочего тела ДВС с газотурбинным наддувом. Модели реализуются в модулях библиотеки подпрограмм. При реализации учтены требования по обеспечению связи показателей турбомашин с режимными параметрами и конструктивными параметрами проточной части, а также по поддержке процедур параметрической идентификации моделей. Модели применены для анализа процессов газообмена в дизеле с газотурбинным наддувом.

Ключевые слова: поршневые двигатели; комбинированные двигатели; рабочие процессы; математические модели; моделирование; пакеты прикладных программ.

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Современные инструменты для расчетного анализа процессов в технических системах (включая тепловые двигатели и энергоустановки) – пакеты прикладных программ (ППП). Общее требование к ППП для моделирования процессов в объектах энергомашиностроения – поддержка решения на ЭВМ *прямых* задач расчета показателей изделия на установившихся и переходных режимах. ППП должен также быть эффективным инструментом для ответственных проектировочных расчетов, т. е. решения *обратных* задач *идентификации* моделей и *оптимизации* конструкции двигателя и ЭУ, систем и алгоритмов управления.

Для расчетов на ЭВМ процессов в *газовоздушных трактах* (ГВТ) комбинированных двигателей нужны модели, описывающие нестационарное течение через агрегаты наддува – компрессоры и турбины. Рассмотрение ступеней турбомашин как *граничных сечений* между участками ГВТ приводит к «квазистатическим» моделям течения *рабочего тела* (РТ) в них; это согласуется с гипотезами, положенными в осно-

ву модели одномерного нестационарного течения РТ в ГВТ. Включение данного класса моделей в численный расчет неустановившегося течения корректно в составе процедур решения локальной обобщенной задачи о *распаде производного разрыва* (РПР) параметров потока в граничном сечении – известный [1] и отработанный [2, 3] подход.

Поставлена задача реализовать в математическом обеспечении ППП полный набор моделей турбомашин и вспомогательных процедур, полезный для практических расчетов комбинированных двигателей. Это потребовало специального исследования, в котором проанализированы требования к модулям, построена их иерархия и спроектирована архитектура прикладных модулей, которые частично реализованы.

В данной статье приведены основные выводы анализа и некоторые результаты практической разработки и применения моделей лопаточных машин в ГВТ ДВС.

ПРЕДЫСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

На всех этапах *жизненного цикла* (ЖЦ) теплового двигателя, и, в частности, на стадии доводки его показателей до заданных значений, нужен *пакет прикладных программ* (ППП) как эффективный инструмент для ответственных расчетных работ.

Разработанной в 1990-е гг. на кафедре ДВС УГАТУ *системе имитационного моделирования* (СИМ) «Альбея» были присущи ограничения, не позволившие развить ее в отвечающий современным требованиям ППП. Это замедлило развитие и библиотек прикладных моделей *структурных элементов* (СЭ) ГВТ (и др. подсистем двигателей), и методик моделирования, нацеленных на решение проектировочных и доводочных задач в энергомашиностроении. В частности, для СИМ «Альбея» так и не были разработаны модели СЭ вида ступеней лопаточных машин, применимые для практических расчетов комбинированных двигателей.

Новый ППП ALLBEA [4] разрабатывается на кафедре ДВС УГАТУ с 2009 г. как замена СИМ «Альбея». Имеющиеся модели СЭ ГВТ (и др. подсистем двигателей и ЭУ) приводятся в соответствие со стандартом ALLBEA для интеграции с этим ППП; планы НИР кафедры ДВС предполагают развитие библиотек прикладных моделей.

В этой связи поставлена задача разработки и реализации набора прикладных моделей ступеней лопаточных машин в нестационарном потоке. На начальной стадии выполнены анализ состояния вопроса и требований к моделям, далее последовали проектирование и практическая реализация.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ

Принятым в ALLBEA (и аналогичных ППП) подходом к численной реализации моделей процессов определяется класс создаваемых моделей лопаточных машин в ГВТ ДВС. Эти модели должны позволить определять текущие величины газодинамических потоков в граничных сечениях в ходе численного расчета по «глобальной» модели квазиодномерного нестационарного течения рабочего тела в ГВТ. Исходные гипотезы этой модели определяют применимость квазистатических соотношений в подмоделях граничных сечений. Такие сечения, по существу, – особые границы между ячейками конечно-объемной сетки ячеек, вводимой при *ID*-м представлении профиля ГВТ. В данном случае в таком сечении на расчетной схеме ГВТ располагается устройство, подводящее к потоку (или отводящее от потока) *энергию* в основном в форме *работы* – компрессор или турбина.

Уровень моделей компрессоров и турбин обсуждаемого класса ограничен еще *дополнительными* гипотезами. В первом приближении течение РТ через *проточную часть* (ПЧ) ступени рассматривается как теплоизолированный поток совершенного газа ($R = \text{const}_1$, $k =$

$= c_p/c_v = \text{const}_2$). Как следствие, такую модель ступени составят известные квазистатические соотношения между сечениями на входе и на выходе из ступени, и в их числе – эмпирическая характеристика ступени, связывающая *два* интегральных *показателя* ее работы с «режимными» параметрами.

Для *базовых* вариантов моделей турбомашин прикладной библиотеки моделей имеет смысл принять и традиционные допущения об *автомодельности* течения в ПЧ по *Re* и о неизменности свойств РТ. Тогда будет применима обычного вида *универсальная характеристика* конкретной ступени (в приведенных параметрах), где 2 «режимных» параметра (в области допустимых значений) определяют 2 показателя работы ступени.

Таким образом, в обсуждаемом классе моделей («квазистатические ступени турбомашин») базовой должна быть модель отдельной компрессорной или турбинной ступени на основе универсальных характеристик. Процедуры, включающие модель в численный расчет, могут быть в основном отработаны уже на основе реализованных *базовых* вариантах моделей.

Внутреннее представление модели при этом может быть достаточно произвольным; необходимо лишь, чтобы показатели ступени связывались, как минимум, с двумя «режимными» параметрами. Причем важнейшее требование – как можно более широкая (но в пределах адекватности) область их допустимых значений. Это требование предъявляется уже к модели, реализующей «эмпирическое» представление (аппроксимацию) характеристики. Это требование актуально и для моделей, представляющих характеристики ступеней и на основе «феноменологического» подхода – т. е. модели, в которых расчет характеристики ступени реализован как приближенный газодинамический расчет ПЧ.

Наличие таких «феноменологических» моделей течения в ПЧ ступеней, учитывающих *конструктивное исполнение* – требование к набору моделей, диктуемое необходимостью решать задачи расчетной *оптимизации* («синтеза»). Другое необходимое требование – поддержка *идентификации* модели, что означает ее дополнительную параметризацию и достигается введением «калибрующих» коэффициентов в модель на разных уровнях ее иерархии.

При этом в наборе программных модулей, реализующих модели характеристик ступеней, нужно обеспечить (в идеале) учет произвольной структуры ПЧ при произвольной же степени параметризации модели. Понимая невыполнимость требований к набору прикладных про-

граммных модулей в такой формулировке, мы применили традиционный подход: предоставление базового функционала при обеспечении расширяемости. Для приближенно представляющих характеристики ступеней «феноменологических» моделей ограничили грубым структурным делением (турбины: осевые, осерадиальные и т. д.) и базовыми реализациями моделей. Сочетание разумно ограниченной номенклатуры моделей с расширением (при необходимости) набора за счет внешних вспомогательных моделей должно обеспечить достаточную степень их универсальности в применении.

Итак, поддержка расчетной оптимизации в основном будет обеспечена при наличии в структуре модели СЭ (турбины, компрессора) некоторых базовых вспомогательных «феноменологических» моделей. Поддержка же идентификации модели изделия достигается введением в модель СЭ «калибрующих» параметров – для ПИ как самой модели СЭ, так и (в принципе) «глобальной» сетевой имитационной модели изделия. Действительно, вспомогательные модели турбомашин (включая «феноменологические» модели характеристик) должны поддерживать ПИ уже по ограниченному набору точек характеристик – внутренними средствами самой модели, через интерфейс к ППП. Параметры для ПИ следует вводить в модель СЭ первую очередь как постоянные безразмерные поправочные коэффициенты к определяющим и определяемым параметрам функциональных связей, используемым для замыкания на каждом конкретном уровне структурно сложной модели, и обеспечивать это как расширение базовой модели данного уровня.

Выстраивая на основе такого подхода базовый функционал прикладных моделей, нужно (еще на стадии разработки модульной архитектуры части прикладной библиотеки) обеспечить расширяемость набора моделей – как минимум, посредством:

- углубления существующих (встроенных) моделей – путем расширения номенклатуры и усложнения моделей: например, отказываясь от гипотез, начиная с самых «слабых»: для моделей ступеней – допущений об адиабатности, автомодельности по Re и т. п.;

- подключения «пользовательских» моделей на всех уровнях иерархии моделей (постепенно переводя некоторые из внешних моделей в набор встроенных).

Для определенности ниже будем говорить о модели СЭ ГВТ вида турбины, имея в виду,

что состав моделей и иерархия модулей для модели компрессора в общих чертах аналогичны.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

Модель турбины по отношению к «глобальной» модели течения РТ в ГВТ является вспомогательной, что не исключает возможности выделить также и в ней один (и более) подчиненных уровней, на которых изолированно реализовывались бы разные аспекты требований к модели и реализующим ее процедурам.

Иерархичная архитектура. Задачи программной реализации модели СЭ ТУРБИНА (как для базового варианта, так и в обеспечение развития) в библиотеке моделей **gasdyn** [5] потребовали выработать модульную, многоуровневую (иерархичную) архитектуру (см. рис. 1):

- модуль, предоставляющий интерфейс к расчетным процедурам модели ТУРБИНА как единой сущности. «Клиентами» данного модуля (со стороны ALLBEA) выступают классы C++, «отвечающие» за интеграцию с этим ППП данного модуля (вместе с модулями, реализующими за «фасадом» данного модуля вспомогательные модели и процедуры);

- модули, реализующие процедуры расчета газодинамических потоков по модели ТУРБИНА. Два (и более) участка ГВТ вида емкости и канала могут сходиться на граничном сечении, описываемые моделью ТУРБИНА. Для каждого варианта вызывается соответствующая процедура решения задачи о РПП, замкнутая соотношениями моделей, реализованных на лежащих ниже уровнях иерархии;

- модули, реализующие интерфейс к процедурам расчета показателей ступени в форме универсальной характеристики. Все модули на этом уровне реализуют (через интерфейс для таких процедур) конкретный способ представления характеристики (аппроксимация экспериментальных точек или же газодинамический расчет течения в ПЧ); здесь же – «интерфейсный» модуль для подключения «пользовательских» моделей данного уровня;

- модули, реализующие процедуры газодинамического расчета и разные вспомогательные процедуры, алгоритмы и наборы данных. К этому же уровню иерархии условно относятся «пользовательские» модули, вызываемые модулями верхних уровней и реализующие все необходимое для произвольного способа представления универсальной характеристики ступени.

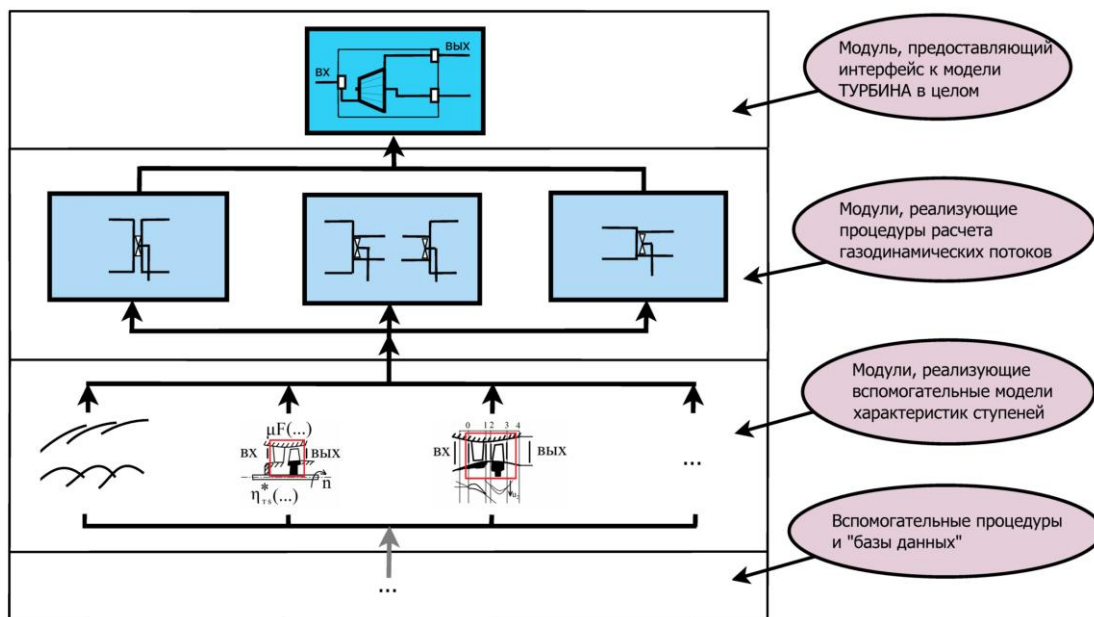


Рис. 1. Многоуровневая архитектура для реализации модели ТУРБИНА

Таким образом, в вершине иерархии – модуль, представляющий модель ТУРБИНА как единую сущность в численном расчете течения в ГВТ. Этот модуль абстрагирует «клиентский» ППП от структурно сложной реализации, которой обеспечивается гибкость, параметризация и расширяемость модели; внизу иерархии – вспомогательные процедуры, алгоритмы и наборы («базы») данных. Такая архитектура позволяет применять и целенаправленно развивать математическое обеспечение для модели СЭ ТУРБИНА с учетом главных аспектов требований.

Программная реализация. Модули, реализующие модели всех уровней для СЭ ТУРБИНА, решено разрабатывать в составе библиотеки **gasydyn** [5], в применяемом там стандарте на интерфейс и оформление модулей на языке программирования *C*.

В этом стандарте модулям «вниз» по иерархии передаются адреса структур исходных и инициализированных данных, определяющих полностью рабочий контекст, включая текущие значения параметров для ПИ модели.

В той же библиотеке реализуются и программные тесты *корректности* модулей – на тестовых задачах, с привлечением моделей разных уровней иерархии. Применение модулей для численных расчетов реальных объектов возможно при интеграции с конкретным пакетом (например, с ALLBEA [4]).

ПРИМЕР КОНКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

При заложенных в основу базовой модели ТУРБИНА гипотезах в ней применима универсальная характеристика турбинной ступени

$$\frac{p^*}{p_0} = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{p_0}{p^*} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{T_0}{T^*} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{n}{n^*} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

где определяющими выступают «режимные» параметры – *степень понижения давления* и *приведенные обороты*, а показателями – *внутренний изэнтропический КПД* и *приведенный расход*. Характеристика (1) замыкает соотношение базовой модели ТУРБИНА, здесь – p^*

$$s, \quad T_{\text{ВЫХ}}^* = T_{\text{ВХ}}^* - l_T^*/c_p, \quad l_T^* = \eta_T^* l_{T s}^*$$

Функциональные связи вида (1) и процедуры для задания их областей допустимых значений, определяют «интерфейс» *вспомогательных моделей* (рис. 1). Каждая из них реализует расчет показателей (1) на базе того или иного внутреннего представления. Модели данного уровня обеспечивают (в большей или меньшей степени) учет конструктивных особенностей ступени; где *базовый* вариант – формальная аппроксимация (1) по точкам измеренных показателей конкретной турбины. Прочие модели этого ряда имеют в основе ту или иную расчетную схему ПЧ, принимают набор конструктивных параметров, а также используют внутренние параметры и процедуры для ПИ – (а) по данным об

измеренных показателях турбины и (б) с целью дополнительной «калибровки».

Поясним сказанное, приведя как пример базовую модель из набора «феноменологических».

Базовый вариант вспомогательной «феноменологической» модели. В этой модели показатели ступени вычисляются на основе пары однопараметрических зависимостей

где C_1 – коэффициент напора, C_2 – окружная скорость, C_3 – эквивалентное проходное сечение, определяемое как

$$C_3 = \frac{F}{F_0}$$

На основе (2), модельных соотношений для n_{TS}^* и др., а также определений величин μF , решением нелинейных уравнений выражаются (1) и находятся границы области их допустимых значений. Этот расчет опирается на внутреннее представление зависимостей (2) и в реализованном базовом варианте модели берется зависимость

связывающие нормированные значения определяющего и определяемых параметров

$$\frac{n_{TS}^*}{n_{TS}^*} = \frac{C_1}{C_1} \frac{C_2}{C_2} \frac{C_3}{C_3}$$

где n_{TS}^* , C_1 , C_2 , C_3 – характерные значения, соответствующие опорному режиму (например, расчетному режиму).

Базовая идентификация модели. Указанные три параметра опорного режима – главные внутренние параметры модели. Определение их – по данным об измеренных показателях ступени (для единственной «опорной» точки или набора точек, или любым возможным способом) – это, по существу, ПИ модели данного уровня. Требуется встроенная (вначале базовая, а затем расширенная) поддержка ПИ такого рода в реализующем модель программном модуле.

Идентификация для «калибровки». Для выполнения требования о поддержки такой ПИ модель содержит три дополнительных «калиб-

ровочных» параметра. Первые два – C_1 – поправочные коэффициенты в (3); с их учетом

Третий коэффициент C учитывается в обеих функциях (3) простейшим способом: на него умножаются значения абсцисс в таблицах для аппроксимации η_{TS}^* и μF .

В данном варианте модели – постоянные, зависимость их от каких-либо параметров расчета может быть задана только «внешней» процедурой ПИ в применяемой расчетной методике. Легко видеть, что случай 1 соответствует отсутствию «калибровки».

Представление (2) на основе (3) и (4), т. е. для безразмерных (нормированных) определяющих и определяемых величин дает ряд преимуществ. Во-первых, возможно использовать в расчете по (3) зависимости для ступеней иных типоразмеров. Во-вторых, калибрующие коэффициенты имеют простой смысл, и при малом их числе действительно, гибко и равномерно изменяют протекание характеристики.

Отметим, что, как следует из (2), данный вариант модели формально не учитывает режимного параметра $n_T / \sqrt{T_{вх}^*}$ в (1), что чревато отклонениями от действительных показателей при существенных отклонениях от опорного режима по n_T и особенно – по $T_{вх}^*$.

Однако, как и всякая базовая модель, описанная модель допускает обобщения, в которых наиболее существенные ее недостатки могут быть исправлены. Но и в базовом варианте модель применима на практике – для малоответственных расчетов или как временное решение при отсутствии подробных данных о показателях ступени (на стадии отладки прототипа модели двигателя или ЭУ в ППП). Для применения в ответственных расчетах описываемую вспомогательную (в составе модели СЭ) модель можно как подвергнуть ПИ, так и переключиться (без изменения структурной схемы модели объекта) на более адекватную модель.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках описанной многоуровневой модульной программной архитектуры (рис. 1) продолжается разработка и реализация моделей лопаточных машин для численных расчетов процессов в комбинированных ДВС.

Набор моделей, реализованных к настоящему времени, применен в исследовательском

расчетном проекте [6] (рис. 2). В реализованной расчетной методике опробована ПИ на основе «калибровочных» коэффициентов описанной здесь модели по критерию соответствия расчетных интегральных показателей ДВС измеренным значениям.

Планами развития ППП ALLBEA [4] и библиотеки моделей **gasydyn** [5] предусмотрено расширение арсенала моделей характеристик турбомашин. Модели этого класса (позволяющие учитывать основные конструктивные параметры ступени и также допускающие калибровку) позволят выполнять оптимизационные расчеты, направленные на достижение требуемых показателей комбинированных ДВС.

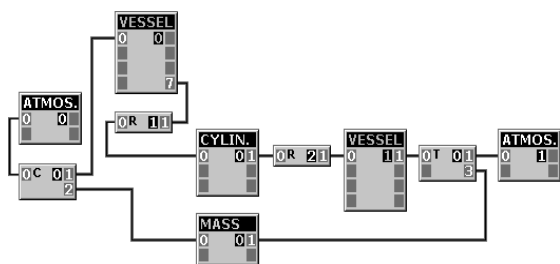


Рис. 2. Структурная схема модели в расчетном проекте [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты анализа требований к математическим моделям турбомашин в нестационарном потоке и описаны (а) модульная архитектура для реализации моделей в прикладном программном обеспечении и (б) базовый вариант математической модели для представления характеристики ступени турбины. Отметим следующее:

1. Требованиями к математическим моделям турбомашин рассмотренного класса диктуется учет более или менее широких наборов конструктивных параметров ПЧ ступени и поддержка процедур параметрической идентификации разными уровнями моделей.

2. Для соответствия прикладных моделей этим (и другим, затрагивающим ряд аспектов моделирования) требованиям предложена модульная и многоуровневая архитектура; проработаны вопросы интеграции (имеющихся и планируемых) моделей как в имеющуюся библиотеку моделей, так и (в ее составе) с пакетами прикладных программ.

3. На этой основе в модулях прикладного программного обеспечения реализован набор моделей с базовой поддержкой рассмотренных требований, позволяющий численно рассчитывать газодинамические процессы в поршневых двигателях с турбонаддувом.

4. Получен практический опыт применения реализованных моделей к расчетному анализу и оптимизации процессов газообмена в двигателях с газотурбинным наддувом.

5. Разработка математических моделей и их интеграция в ППП продолжаются. Модели характеристик ступеней турбомашин, основанные на расчетных схемах течения в проточной части ступени с учетом основных параметров конструкции ступени и поддерживающие калибровку, нацелены на оперативное решение задач расчетного синтеза конструкций газоздушных трактов комбинированных ДВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудой Б. П. Прикладная нестационарная гидрогазодинамика. Уфа: УАИ, 1988. 184 с. [B. P. Rudoi, *Applied non-stationary hydro- and gasdynamics*, (in Russian), Ufa: Ufa Aviation University "UAI", 1988.]

2. Черноусов А. А. Модель нестационарного течения через турбину // Вестник Академии военных наук. 2010. № 1 (30). С. 244–249. [A. A. Chernousov, "Design and unsteady flow through turbine," (in Russian), in *Vestnik Akademii Voyennykh Nauk*, no. 1 (30), pp. 244-249, 2010.]

3. Черноусов А. А. Модель нестационарного течения через компрессор // Вестник Академии военных наук. 2011. № 2 (35). С. 324–327. [A. A. Chernousov, "Design and unsteady flow through compressor," (in Russian), in *Vestnik Akademii Voyennykh Nauk*, no. 2 (35), pp. 324-327, 2011.]

4. 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. [R. D. Enikeev, A. A. Chernousov, "Design and implementation of software package for analysis and synthesis of complex technical objects," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 5 (50), pp. 60-68, 2012.]

5. Черноусов А. А. Модель процессов в газоздушном тракте двигателя внутреннего сгорания **gasydyn**: свид.-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2013618150. М.: Роспатент, 30.08.2013. [A. A. Chernousov, "Model of process in gas and air tract of internal combustion engines: **gasydyn**," (in Russian), *Rospatent*, computer software registration sert. no. 2013618150, 2013.]

6. Терегулов Т. И., Черноусов А. А. Программный пакет ALLBEA: расчетный анализ и синтез характеристик газообмена дизеля с турбонаддувом // Двигателестроение. 2013. № 3 (253). С. 28–32. [T. I. Teregulov, A. A. Chernousov, "Software package ALLBEA: numerical analysis and synthesis of parameters of turbocharged diesel engines," (in Russian), in *Dvigatelistroenie*, no. 3 (253), pp. 28-32, 2013.]

ОБ АВТОРАХ

ЧЕРНОУСОВ Андрей Александрович, д-р-ант каф. двигателей внутреннего сгорания. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. числ. моделирования рабочих процессов ДВС.

ТЕРЕГУЛОВ Тимур Ирекович, асп. той же каф. Дипл. инж.-мех. по ДВС (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. моделирования газообмена комбинированных двигателей. Готовит дис. о моделях агрегатов наддува ДВС.

METADATA

Title: Mathematical models of turbomachinery stages for numerical simulation of turbocharged piston engines and their implementation.

Authors: A. A. Chernousov¹, T. I. Teregulov²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: andrei.chernousov@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 4 (65), pp. 13-19, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The requirements to models and procedures representing the characteristics of turbomachinery in the working fluid flow within the turbocharged piston engine are analyzed. For development and implementation of the models in applied software library, a set of requirements is taken into account: models must adequately represent performance of turbomachinery with respect to regime and design parameters of turbomachinery stages and provide or facilitate parametric identification. Models are implemented as modular library routines and applied to analyze the processes of gas exchange in turbocharged diesel engine.

Key words: piston engines; turbocharging, working processes; simulation; simulation software packages.

About authors:

CHERNOUSOV, Andrei Aleksandrovich, Associate Prof., Dept. of Internal Combustion Engines. Dipl. Mech. Eng. (UGATU, 1994). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 1998).

TEREGULOV, Timur Irekovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Internal Combustion Engines. Dipl. Mech. Eng. (UGATU, 2010).