

Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Абызов О.В.
(Кафедра «Инжиниринг силовых установок и транспортных средств»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого»)

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО И СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРА ПОРШНЕВОГО ДВС

Срок создания и качество проектирования современного высокофорсированного ДВС во многом определяется уровнем применяемых средств моделирования рабочих процессов, теплового и напряженно-деформированного состояния деталей и узлов двигателя. При этом наиболее сложным для моделирования узлом двигателя является его головка цилиндров. Это является следствием сложной конструктивной формой головки, которая не может быть представлена иначе, как в трехмерной постановке. Сложная система высокоинтенсивных механических нагрузок, действующих на головку, ее высокая податливость и при этом – важность для работоспособности уровня и характера распределения деформаций как по зоне газового стыка, так и в зоне расположения механизма газораспределения, резко уменьшает возможность упрощения трехмерной модели головки. Высокая теплонапряженность этого узла требует обеспечения высокой точности расчета температур головки цилиндра. А это, в свою очередь, требует достаточной точности и достоверности задания граничных условий теплообмена по всем тепловоспринимающим и теплоотдающим поверхностям головки. При этом тепловые потоки, формирующие тепловую нагрузку на тепловоспринимающие поверхности головки, имеют различную физическую природу.

На кафедре «Инжиниринг силовых установок и транспортных средств» была разработана комплексная методика проектирования головок цилиндров высокофорсированных ДВС, в которой решены задачи моделирования условий нагружения, теплового и напряженно-деформированного состояния этого важнейшего узла ДВС. Блок-схема программно-методического комплекса, являющегося основным блоком системы проектирования, представлена на рис.1.

Тепловая нагрузка со стороны огневой поверхности головки формируется по механизмам вынужденной конвекции и радиационного

теплообмена. Расчет процесса теплообмена требует предварительного моделирования рабочего цикла в цилиндрах и каналах головки цилиндров ДВС для определения мгновенных значений давлений и температур в этих рабочих полостях. Блок расчета рабочего процесса построен на базе численного интегрирования уравнений первого закона термодинамики для открытой термодинамической системы «впускной канал – цилиндр – выпускной канал», с использованием системы допущений, сформулированных в [1,2,4]. При моделировании используются полуэмпирические описания процессов сгорания топливо-воздушной смеси в цилиндре дизеля, показавшие свою высокую надежность в процессе длительной практической апробации методики.

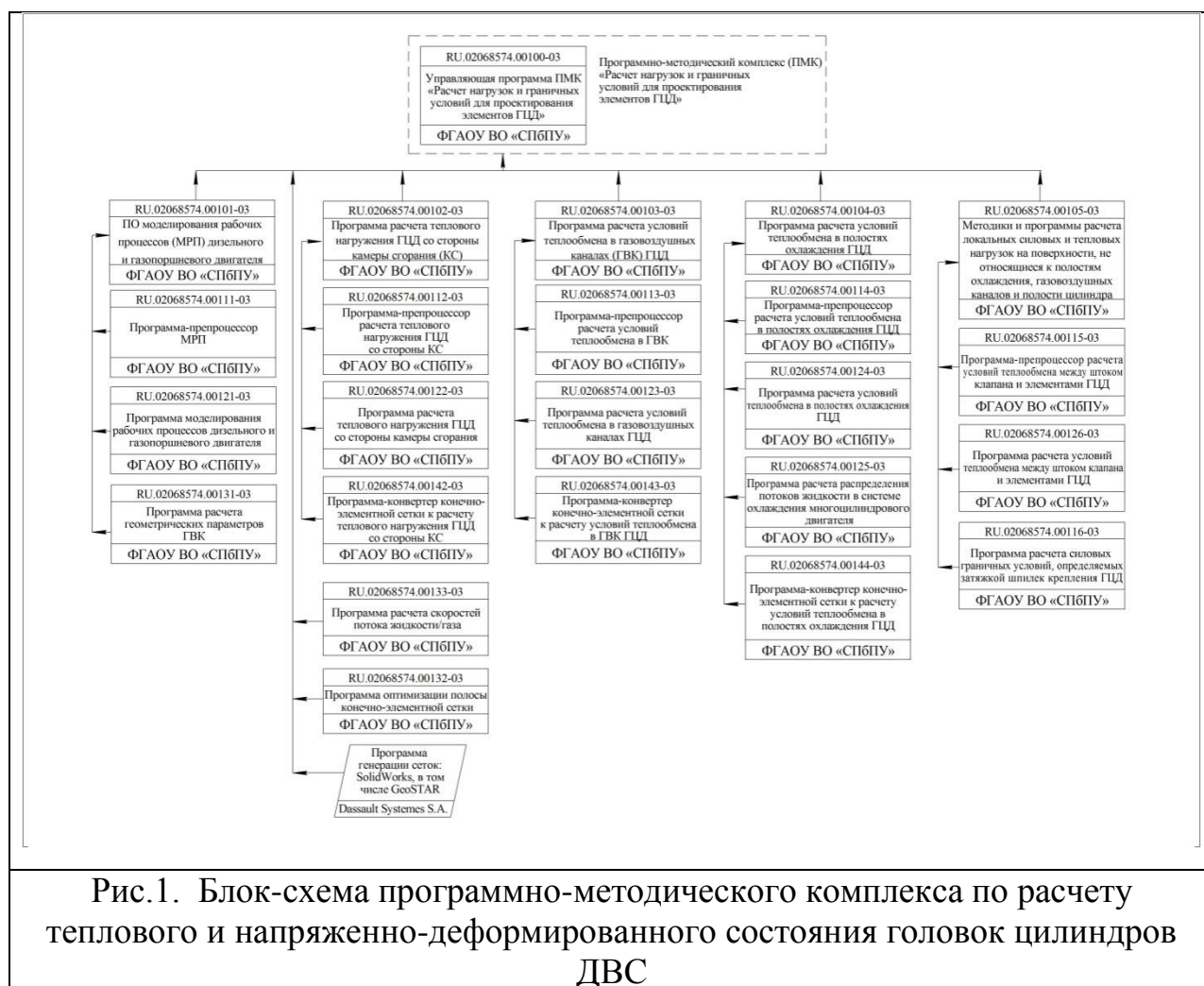


Рис.1. Блок-схема программно-методического комплекса по расчету теплового и напряженно-деформированного состояния головок цилиндров ДВС

Расчет процесса конвективного теплового нагружения огневой поверхности камеры сгорания требует расчета мгновенных локальных скоростей обтекания головки цилиндра рабочим телом. Этот расчет проводится численным методом с использованием конечно-элементных

моделей рабочей полости цилиндра с учетом переменной геометрии из-за движения поршня (рис.2). В качестве граничных условий для расчета полей скоростей в цилиндре задаются вытеснительная скорость на подвижной поверхности поршня и скорости газа на клапанных щелях.

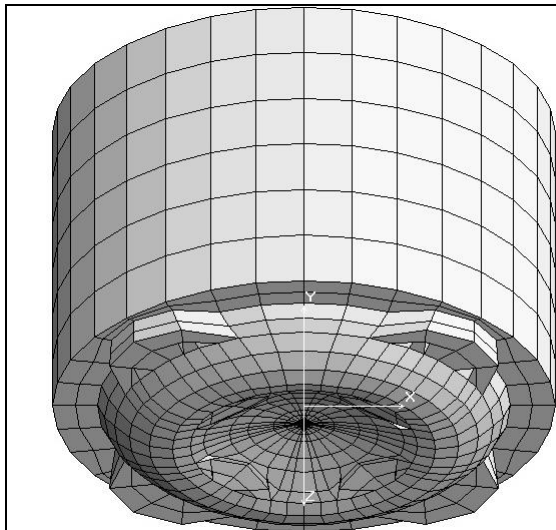


Рис.2. Конечно-элементная модель камеры сгорания дизеля

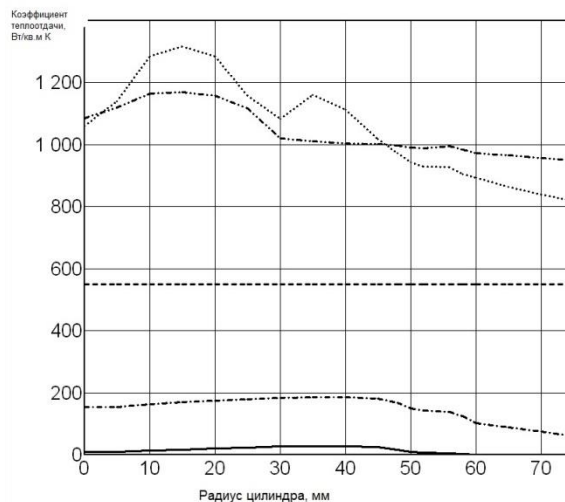
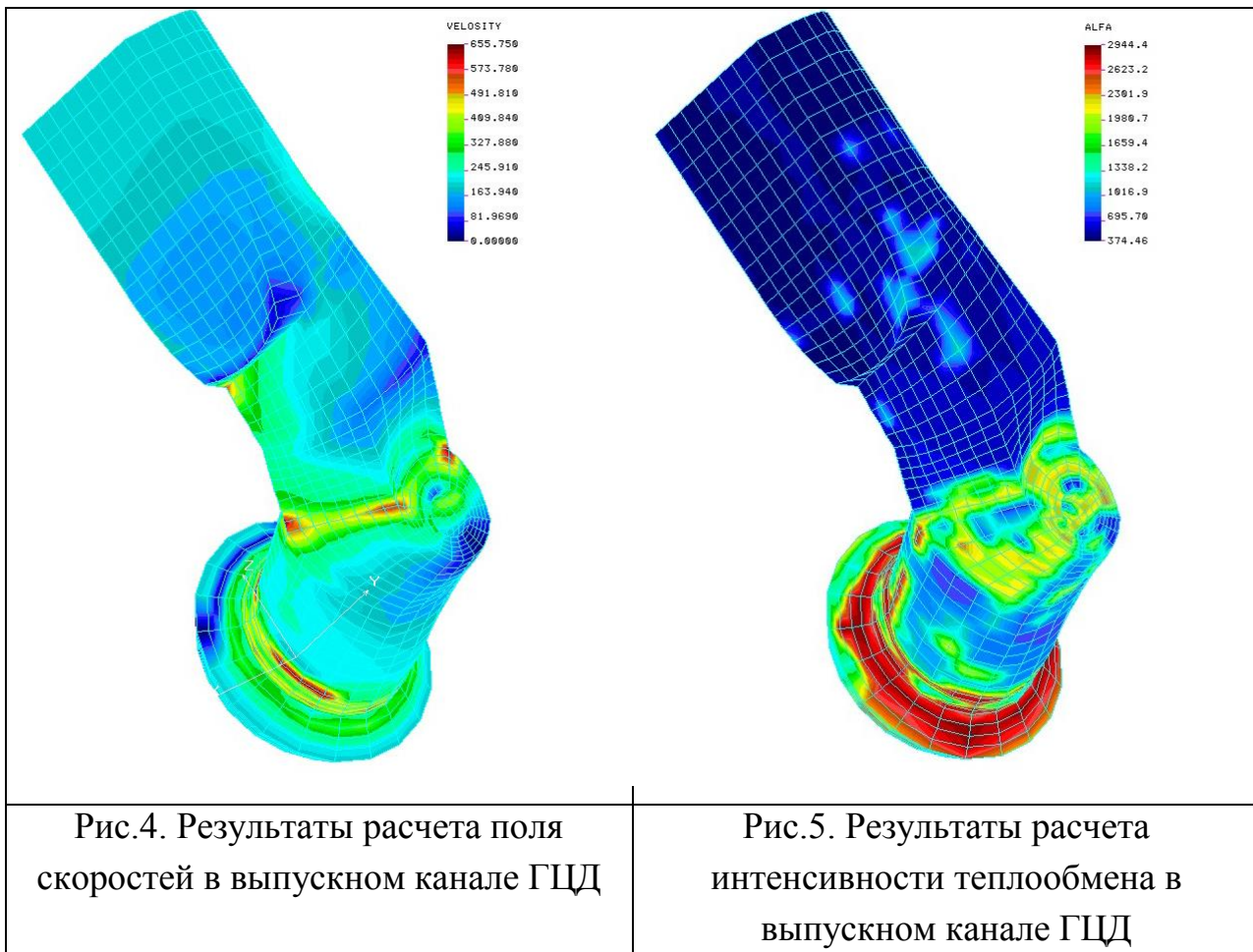


Рис.3. Результаты расчета результирующих температур и коэффициентов теплоотдачи по огневой поверхности головки цилиндров

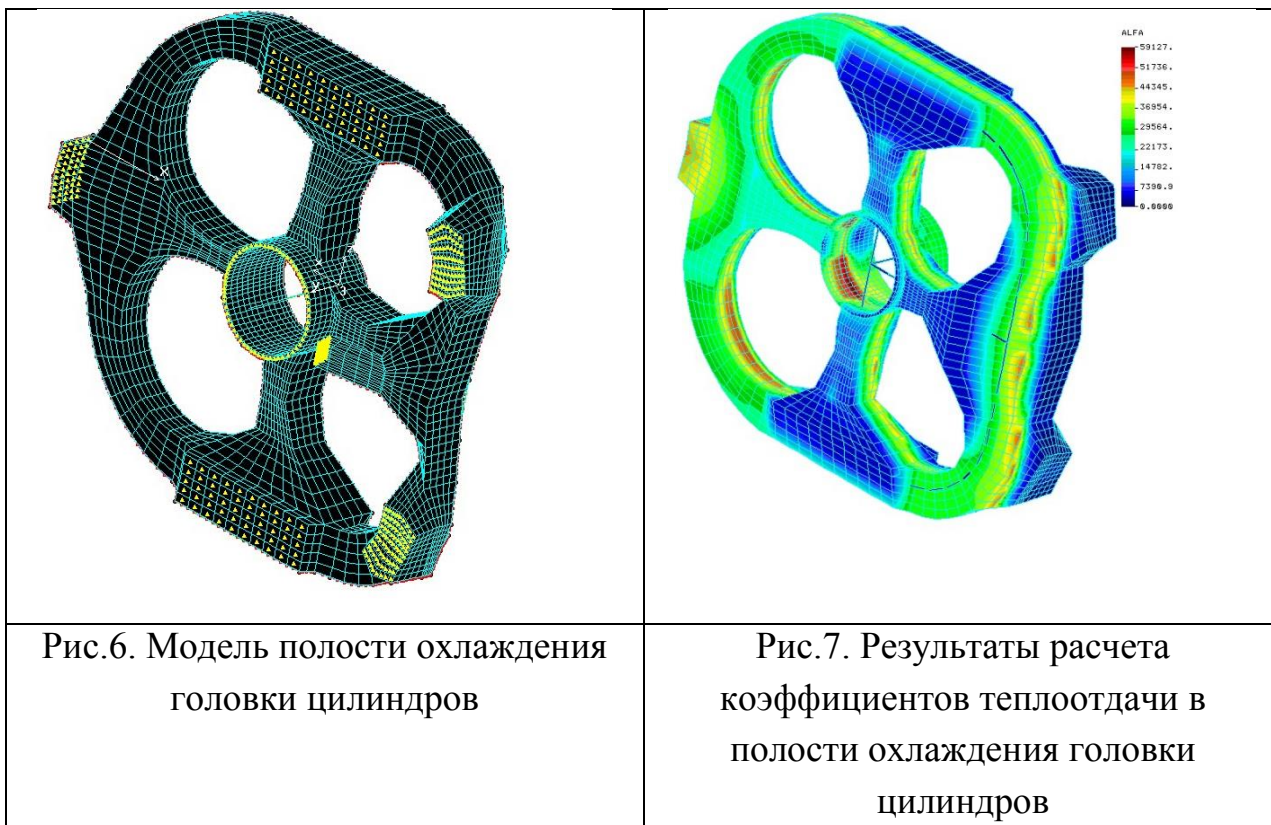
Расчет коэффициентов теплоотдачи и результирующих температур по огневой поверхности головки проводится с использованием модели теплообмена на поверхности при внешнем обтекании градиентным потоком газа [2,3,7,8]. Мгновенные локальные значения коэффициентов теплоотдачи усредняются по рабочему циклу. Лучистый теплообмен в камере сгорания описывается с помощью модели, предложенной в [2].

Расчет процессов теплообмена в газоздушных каналах строится на базе моделирования процессов вынужденной конвекции на такте газообмена [4,7]. Расчет включает в себя три основных этапа. На первом определяются мгновенные параметры рабочего тела (давление и температура) во впускном и выпускном каналах ГЦД по термодинамической модели рабочих процессов. Эти данные используются для реализации второго этапа расчета - определения граничных условий при решении задачи газодинамики в газоздушных каналах, необходимой для определения скоростного поля вблизи поверхностей теплообмена. На третьем этапе решается задача

конвективного теплообмена при обтекании стенок каналов потоком рабочего тела. Учет процесса теплообмена в газоздушных каналах на этапах сжатия-сгорания-расширения проводится с использованием методики, предложенной в [6].



По теплоотдающим поверхностям полостей охлаждения тепловая нагрузка формируется по механизмам вынужденной конвекции с учетом возможных фазовых переходов охлаждающей жидкости. В разработанном комплексе для решения этой задачи используется метод контрольных объемов (МКО). Методика расчета подразумевает создание сопряженной модели жидкости и твердого тела и задание условий теплового нагружения на поверхностях контакта с рабочим телом: огневой поверхности камеры сгорания, фасках клапанов, впускных и выпускных каналах. Алгоритм работы вычислительного пакета (в работе используется ANSYS FLUENT 14.0 и 15.0) включает совместное решение дискретных аналогов уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии для жидкости совместно с уравнением теплопроводности для твердого тела (корпуса головки цилиндров)[3,4].



Кроме того, в методику включены математические модели теплообмена при динамическом контакте (клапана-седла клапанов), теплопередачи через масляный зазор (стержень клапана - направляющая втулка клапана). Таким образом, результатом работы этой части комплекса является полная система граничных условий теплового и силового нагружения головки цилиндров поршневого двигателя внутреннего сгорания.

Расчет температурного и напряженно-деформированного состояния узла головки цилиндра проводится с использованием метода конечных элементов. При этом формируется совместная объемная модель головки цилиндра и фрагмента блока цилиндров, позволяющая учитывать теплообмен по зоне газового стыка и реальную деформацию нижней плиты головки цилиндра.

Большим достоинством разработанного комплекса является его полная универсальность, исключающая использование для моделирования какого-либо объема предварительной эмпирической информации. Более того, основные методики, разработанные для условий дизельного двигателя, легко адаптируются для расчетов газовых или бензиновых двигателей с искровым зажиганием либо газодизельных вариантов. Возможна адаптация комплекса для расчета головок цилиндров двухтактных двигателей.

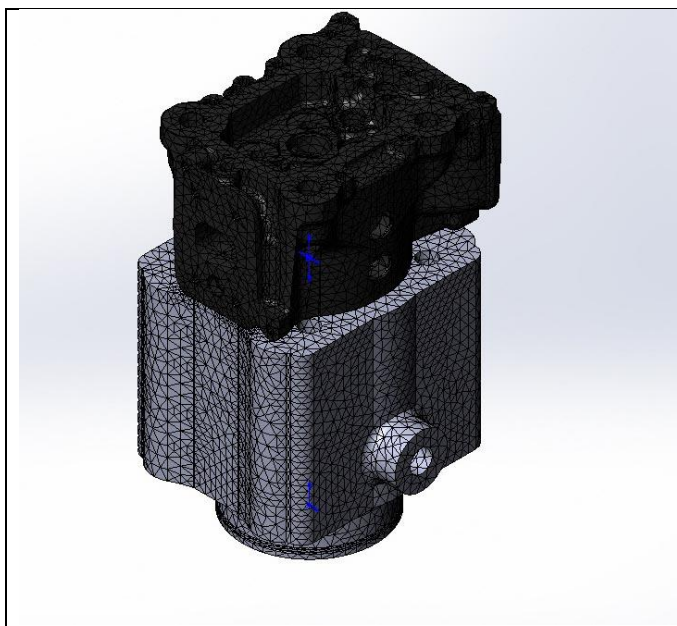


Рис. 8. Численная модель головки цилиндров

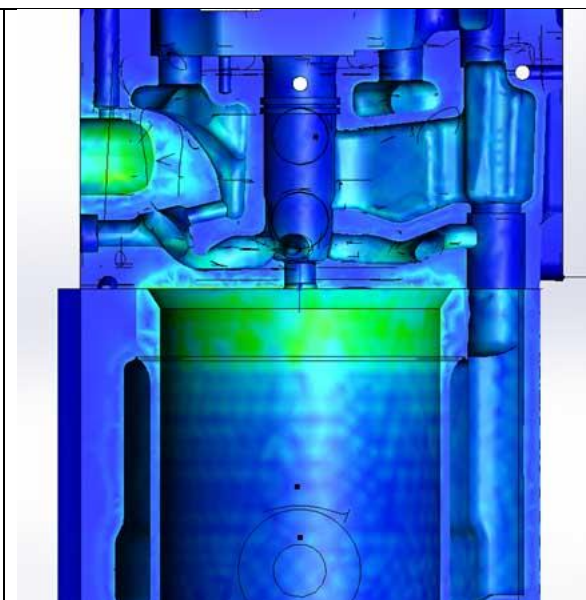


Рис.9. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния модели головки цилиндра

Модели комплекса полностью совместны с форматами данных, используемых графическими системами проектирования типа SolidWork и ProEngineer, что позволяет включить разработанный программный продукт в комплексную сквозную технологию автоматизированного проектирования ГЦД.

С использованием описываемой разработки проведены реальные конструкторские работы по созданию современных высокофорсированных двигателей, которые показали высокую эффективность разработанного программно-методического комплекса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галышев Ю.В. Теория рабочих процессов в ДВС. Расчет рабочего цикла и газообмена в ДВС: учеб. пособие / Ю.В. Галышев, А.Б. Зайцев, А.И. Костин, А.Ю. Шабанов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 196 с.
2. Петриченко Р.М. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ. / Р.М. Петриченко, С.А. Батулин, А.Ю. Шабанов и др.; под общ. ред. Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.: ил.
3. Абызов О.В., Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю. Численное исследование гидродинамики и теплообмена в полости охлаждения головки цилиндра дизеля/ Двигателестроение, №2, 2014, с.8-10
4. Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Немчикова М.Н. Задание граничных условий теплообмена в рабочих полостях головки цилиндра четырехтактного двигателя внутреннего сгорания/ Научно-технические ведомости САБГПУ, №2 (195) 2014
5. Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю., Макарин А.С. Оценка необходимой точности задания граничных условий головки цилиндров двигателя внутреннего сгорания / Вестник ГУМиРФ, №3, 2014, с.75-81
6. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. – 591 с.
7. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Машкур М.А. Новый метод расчета граничных условий теплового нагружения головки блока цилиндров поршневого двигателя // Двигателестроение. — 2005. — № 1. — С. 5–9.
8. Шабанов А.Ю., Машкур М.А. Конечно-элементный метод расчета граничных условий теплового нагружения головки блока цилиндров поршневого двигателя // Деп. в ВИНТИ: N1827-B2004 от 19.11.04., 17 с.
9. Шабанов А.Ю., Сгибнев Ю.Е. Трехмерное моделирование локального теплообмена в КС карбюраторного ДВС с учетом постадийного выгорания топлива. Тезисы к докл. / Материалы 12-го Всесоюзного межотраслевого научно-технического семинара. - Санкт-Петербург, 1992. - с. 51.