

Изучение процессов газообмена, смесеобразования и сгорания в ДВС методом физического моделирования

Физическое моделирование процессов газообмена, процессов смесеобразования и сгорания в ДВС позволяет изучать сложные физические процессы, которые в эксперименте на натурном двигателе наблюдать либо невозможно, либо это настолько технически сложно, что становится мало доступным. К таким процессам относят движение газов в цилиндре двигателя, от которого зависит и качество газообмена, и условия смесеобразования и сгорания топлива. Структура потоков продувочного воздуха в цилиндре двухтактных двигателях, в особенности двигателей с петлевой схемой газообмена, является одним из главных факторов, определяющих качество очистки и наполнения цилиндра. Еще на начальном этапе разработки быстроходных двухтактных двигателей качественные представления о течении газов в цилиндре двухтактного двигателя получены методом визуализации на статических моделях [1]. Результаты изучения процессов в двухтактных двигателях, полученные в Проблемной лаборатории ДВС под научным руководством профессора А.С.Орлина, использованы при разработке двухтактных двигателей транспортного назначения и судовых двигателей. За монографию «Двухтактные легкие двигатели» А.С.Орлина присуждена Государственная премия СССР.

Применение моделей в практике разработчиков ДВС послужило стимулом для того, чтобы рассмотреть основные законы теории подобия в приложении к рабочим процессам [2, 3]. В самом понятии «модель» подразумевается приближенное воспроизведение физического явления: в противном случае, если явление в точности воспроизводится на модели, это не модель, а натуральный образец. Развитие теории подобия процессов газообмена получило в работах под руководством профессора М.Г.Круглова. В каждой конкретной задаче исследования, на этапе разработки модели и при анализе результатов моделирования, требуется определить необходимые и достаточные условия приближенного подобия процессов. К ним относят критерии подобия [4], вид рабочего тела [5], параметры функционирования модели [6] и др.

В изучении процессов газообмена широко применяются физические модели; в них рабочее тело - газ, как и в рабочих циклах ДВС. Установки для физического моделирования могут функционировать либо только при стационарных условиях, либо при стационарных и нестационарных условиях. На моделях изучают структуру потоков, определяют энергетические и расходные характеристики впускных и выпускных каналов и окон, влияние характеристик течения на теплоотдачу в стенки. Моделирование газообмена при нестационарных условиях оказывается целесообразным выполнять, в некоторых задачах, используя в качестве рабочего тела жидкость [7, 8, 9].

На модели выпускного канала с неразветвленным трубопроводом [10] созданы условия на границах, которые исключают воздействие вторичных факторов на течение в канале. Здесь имеется в виду известное влияние разветвления (тройника) на конце выпускного патрубка и неоднородности поля скоростей на стороне входа в выпускной канал. Выравнивание поля скоростей на входе достигается наличием решетки, за которой образуется течение с изотропной турбулентностью. Исследование структуры потока в выпускном канале выполнено при стационарных условиях [11, 12] и при нестационарных [18, 19] - на модели [12] с кривошипно-шатунным механизмом. Модель может действовать как одноцикловая и в непрерывном режиме. В измерениях параметров потока при нестационарных условиях на динамической модели [13] применялись малоинерционные трубки Пито; при изучении течения и турбулентности в нестационарных газовых потоках - метод стробоскопической визуализации [14, 15, 16, 17] разработанный в Новосибирском отделении АН СССР и усовершенствованный в МГТУ. Первое использование метода относится к измерениям структуры потоков и турбулентности в пространстве цилиндра в условиях впуска-сжатия [17]. Показано, что несмотря на значительную диссипацию, интенсивность турбулентности может

увеличиваться в процессе сжатия как за счет уплотнения среды, так и генерации турбулентности при взаимодействии макровихревых потоков. Это позволило предложить способ смесеобразования и турбулизации заряда с двумя вихрями, расслоенными по высоте и радиусу.

Результаты сравнения структуры потока в выпускном канале, измеренной при стационарных и нестационарных условиях, изложены в [18, 19, 20]. И в том и в другом течении характерно наличие вихревых зон, расположенных за клапанной щелью, с точкой отрыва на изломе профиля канала. Размеры вихревой зоны, прилегающей к вогнутой стенке канала значительно меньше, чем зоны у выпуклой стенки. При нестационарных условиях заметно отличается расположение и размеры вихревой зоны при малых подъемах клапана, в начале выпуска, когда течение происходит в околосзвуковой области. Методом визуализации установлено [19], что течение в околосзвуковой области сопровождается серией слабых скачков. Структура течения мало зависит от числа M (в интервале $M=0,1-1,0$). Главным фактором, определяющим структуру потока в канале с клапаном, является относительная величина подъема клапана, $h_{\text{кл}}/d_r$ (отношение высоты подъема клапана к диаметру горловины канала). Заметно влияет на структуру потока профиль канала. Этот результат в той же мере относится к расходным и энергетическим характеристикам канала и клапана. И служит основанием для вывода, полезного в практике моделирования потока при определении коэффициентов расхода канала и клапана и коэффициентов потерь энергии [11].

Рассматривая структуру потока, можно различать три режима течения, границы которых определяются величиной подъема клапана [10, 11, 19, 20]. При небольших подъемах клапана – $(h_{\text{кл}}/d_r) < 0,12$, отрыв потока наблюдается по всему периметру кромки посадочного седла клапана. Характерным является большой градиент давления и скорости по радиусу поперечного сечения канала за клапанной щелью. У стержня клапана образуется ядро потока, вблизи стенки канала скорость приближается к нулю. По всей окружности живого сечения потока наблюдается однородное распределение скорости. На режиме течения при подъеме клапана $(h_{\text{кл}}/d_r) = 0,15-0,30$ поток заполняет все сечение канала за клапанной щелью. Вихревая зона располагается за поворотом канала. Становится заметным след за стержнем и направляющей втулкой клапана, который делит поле скоростей в сечении за поворотом канала на две зеркально симметричные области. Третий режим, переходный – при подъемах клапана $0,12 < (h_{\text{кл}}/d_r) < 0,15$.

Потери энергии определяются в основном размерами вихревых зон на участке за клапанной щелью и за поворотом канала. Путевые потери энергии за поворотом канала (на участке прямого трубопровода постоянного сечения длиной $20d_r$) малы по сравнению с потерями на участке канала длиной $(5-6)d_r$ за клапанной щелью [11]. На участке канала за точкой присоединения разделительной линии тока, на длине до $10d_r$ заметно восстановление давления.

Результаты изучения структуры потока использованы при разработке методики профилирования выпускных каналов [21, 22, 23]. Выполнено профилирование выпускных каналов в четырехклапанной крышке цилиндров четырехтактного двигателя семейства ЧН26/26 Коломенского тепловозостроительного завода [21] двигателя семейства ЧН21/21 и др. В результате оптимального профилирования приращение эффективного проходного сечения выпускного клапана, по сравнению с исходным вариантом, достигает 15-40%.

Физическое моделирование потоков в преобразователе импульсов двигателя с импульсной системой наддува проведено при стационарных условиях [24]. Рассмотрены условия подобия потоков, выполнены измерения структуры потока в пяти сечениях цилиндрической камеры смешения и конического диффузора.

Методом физического моделирования [13] выполнен цикл работ, в которых получены сведения о нестационарном течении и локальном теплообмене в выпускном канале ДВС. В исследованиях структуры нестационарного течения и характеристик турбулентности использован метод стробоскопической визуализации [16, 17]. Методика

измерения локальных тепловых потоков в стенках канала и местной температуры газа в нестационарном потоке и результаты изложены в [25, 55, 26, 27].

Выявлено, что распределение коэффициентов теплоотдачи и тепловых потоков существенно неравномерно не только по времени выпуска, но и участком поверхности канала. Максимальная теплоотдача фиксируется в окрестности фаски клапана в силу высоких скоростей течения, в областях присоединения оторвавшегося пограничного слоя в окрестности бобышки. В силу несимметричности течения различна теплоотдача по периметру канала, увеличиваясь на вогнутой стенке. Высок коэффициент теплоотдачи по всей поверхности клапана. Характер изменения ее по времени коррелируется с изменением среднерасходной скорости, структуры потока, толщине (длине участка роста) пограничного слоя, турбулизации от его отрыва и присоединения. В условиях двигателя тепловой поток доминирует в период свободного выпуска и середины принудительного.

Для нестационарного безотрывного течения газа в каналах разработан метод расчета теплоотдачи на основе концепции локального моделирования, получившей развитие в рамках теории турбулентного пограничного слоя в работах академиков Кутателадзе С.С. и Леонтьева А.И. Для другого характерного случая – с отрывом пограничного слоя – предложена оригинальная методика расчета распределения теплоотдачи по длине обтекаемой стенки [56]. Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при разработке методики расчета тепловых потоков и способов управления тепловыми процессами в выпускной системе ДВС [28,57,29].

Моделирование потоков в выпускной системе двигателей с наддувом имеет свои особенности, которые связаны с условиями прохождения и отражения волн на конце трубопровода, в проточной части турбины [30, 31, 32].

Моделирование течений газа во впускных каналах и трубопроводах

Методом физического моделирования выполнены исследование структуры течения во впускных каналах при нестационарных и стационарных условиях, воздействие волн на наполнение цилиндра двигателя с неразветвленным впускным трубопроводом. Изучено влияние волн в разветвленном впускном трубопроводе на неравномерность наполнения цилиндров многоцилиндрового двигателя.

Изучение структуры нестационарного потока во впускном канале двигателя выполнено на одноцикловой модели [33] при однократном подъеме впускного клапана. В измерениях параметров потока применялись датчики ДМИ. Давление торможения в потоке измерялось малоинерционной трубкой Пито с датчиком ДМИ, в трех точках поперечного сечения канала на удалении двух диаметров от посадочного седла клапана. Цикловой расход воздуха определялся объемным методом по результатам измерения разности давления в ресивере, к которому присоединен неразветвленный впускной трубопровод. Получены результаты для впускных каналов четырехтактных двигателей типа Ч15/18, с трубопроводом, длина которого изменялась вставками коротких труб в пределах от 0,3м до 2,5м, включая длину канала в головке. Коэффициент наполнения имеет три не четко выраженных максимума при изменении длины трубопровода в указанных пределах и при постоянной частоте циклов.

Исследование структуры потока во впускном канале выполнено с двумя вариантами впускного патрубка – с поворотом патрубка на угол 90° и 180° . Структура потока имеет сходство при стационарных и нестационарных условиях. Основное различие в том, что градиент скорости по радиусу в поперечном сечении канала меньше при нестационарных условиях. Различие заметнее для варианта с поворотом впускного патрубка на 180° . Этим различием объясняется полученный в опытах результат: цикловой расход воздуха для вариантов впускного патрубка с поворотом на угол 180° и 90° приблизительно равный при нестационарных условиях, а при стационарных условиях расход воздуха заметно меньше для патрубка с поворотом на угол 180° .

Неравномерность наполнения цилиндров определялось на модели в режиме непрерывного вращения кулачкового вала, с впускным трубопроводом

шестицилиндрового двигателя [34]. Вход в трубопровод с конца, со стороны первого цилиндра. Большая неравномерность наполнения цилиндров двигателя наблюдается с трубопроводом, площадь поперечного сечения которого равна площади сечения впускного патрубка [35]. Наименьший коэффициент наполнения получен для пятого цилиндра – на 8% меньше осредненного для двигателя. Основные причины неравномерности наполнения – воздействие волны разрежения от предыдущего по порядку работы цилиндра. Имеет значение и расположение цилиндра относительно входа во впускной трубопровод. На установке с ударной трубой выполнено моделирование нестационарного потока в разветвлениях впускного трубопровода [36, 37], измерены параметры потока в характерных сечениях тройника. Определены потери энергии в тройниках различного вида. Полезный для конструкторов результат получен при изучении отражения волны разрежения на стенке, противолежащей входному сечению впускного патрубка [37]. Наполнение цилиндра двигателя значительно ухудшается, если расстояние от входного сечения канала (в тройнике) до стенки впускного трубопровода меньше приведенного диаметра впускного патрубка.

На модели двигателя с ПДП [38] выполнены исследования качества газообмена для различных вариантов впускных и выпускных окон. Поршни модели приводятся в движение двумя косыми шайбами со специальным профилем, которые установлены на ведущем валу, расположенном параллельно оси цилиндра модели. Размеры цилиндра двигателя и модели равны. Ход поршня модели в 2,5 раза меньше хода поршня двигателя. Профиль шайбы обеспечивает кинематическое подобие движения поршня модели и двигателя в поясе впускных и выпускных окон. Такое конструкторское решение принято с той целью, чтобы разместить приемники давления и скорости в части пространства цилиндра, и выполнять измерения параметров потока при движении поршней. Для измерения скоростей газов в цилиндре применялся ионный анемометр, разработанный в проблемной лаборатории ДВС МВТУ им. Н.Э.Баумана [45, 49].

Структуру потока в цилиндре двухтактного двигателя с клапанно-щелевой схемой газообмена изучали на модели двигателя [12] при стационарных условиях. Распределение скоростей в поперечном сечении цилиндра с удовлетворительной точностью подчиняется законам движения твердого тела – в области, прилегающей к оси цилиндра, и потенциального (свободного) вихря – в периферийной области [39, 40]. Характерно наличие центральной вихревой области с обратным течением, осесимметричной относительно оси цилиндра.

Цикл работ, в которых методом визуализации изучались процессы смесеобразования и сгорания в дизелях, выполнены под руководством профессора Д.Н.Вырубова. В работе [41] исследовались процессы смесеобразования и сгорания в дизеле с цилиндрической вихревой камерой сгорания. На работающем двигателе стало возможным прямое наблюдение распространения распыленной струи топлива, образования первоначальных очагов пламени, распространения пламени и взаимодействия пламени со стенками камеры сгорания.

В работах [42, 43, 44] изложены результаты исследования пленочного смесеобразования на модели в условиях, подобных условиям смесеобразования в камере сгорания дизеля автотракторного типа. Моделирование пленки топлива осуществлялось в бомбе при впрыскивании струи распыленного топлива на подогретую вогнутую цилиндрическую поверхность. Образование и испарение пленки топлива фиксировалось на киноплёнку с частотой кадров до 20000 1/с.

Исследование и оптимизация процессов смесеобразования и сгорания в дизелях автотракторного типа проведено в плане разработки неразделенных камер сгорания вместо вихревой. Поиску оптимальных конструктивных и режимных параметров, определяющих эффективность процесса сгорания, посвящены работы [46, 47, 48]. Варьировалось соотношение диаметра горловины камеры сгорания в поршне к диаметру цилиндра, число отверстий в распылителе форсунки и вихревое отношение для

тангенциального вихря. Камеры сгорания в поршне с оптимальными размерами, полученными в результате работы, реализованы на серийных образцах двигателей автотракторного типа.

Новые научные результаты получены на модели для визуального наблюдения процесса смесеобразования и сгорания четырехтактного дизеля с неразделенной камерой сгорания [50]. Конструкция модели разработана под руководством доцента В.П.Алексеева с участием ст. преподавателя кафедры «Теоретическая механика» Г.А.Рассолюко. Модель построена на базе одноцилиндровой установки для экспериментальных исследований двигателя. На месте головки цилиндра на модели установлено круглое окно из жаропрочного стекла толщиной 70 мм, которое изготовлено на Красногорском оптикомеханическом заводе. Диаметр окна достаточный для того, чтобы наблюдать все поле камеры сгорания над поршнем. Киносъемка процессов смесеобразования и сгорания произведена в отраженном от поршня свете скоростной кинокамерой СК-6 с частотой кадров 3000 1/с.

Выполнено исследование и отснят кинофильм в двух частях [52] процессов объемного смесеобразования в неразделенной камере сгорания и пленочного смесеобразования для варианта камеры сгорания в поршне. Получены результаты о закономерностях распространения распыленной струи топлива в камере сгорания при одноразовом впрыскивании топлива. Чтобы исключить воспламенение топлива в этих опытах, в качестве рабочего тела использовался азот. Жаропрочное стекло выдержало термические и механические нагрузки и в опытах с воспламенением топлива [51]. В серии экспериментов варьировались параметры впрыскивания топлива, направление распыленной струи, вихревое отношение для тангенциального вихря и режимные параметры.

Основываясь на результатах исследований, профессор Д.Н.Вырубов обосновал вывод [53], который имеет важное значение в оптимизации процессов смесеобразования и сгорания в высокооборотных дизелях: оптимальное решение не обязательно находится в области с большим вихревым отношением для тангенциального вихря. Или, другими словами, оптимальные результаты можно получить и при большом и при малом вихревом отношении. Практика показала справедливость такого вывода. В последних образцах высокооборотных дизелей вихревое отношение уменьшено, чтобы уменьшить выбросы твердых частиц [54]. Расход топлива при этом не изменяется.

Литература

1. Орлин А.С. Двухтактные легкие двигатели // М.: Машгиз.-1950.– 342с.
2. Орлин А.С., Круглов М.Г. Комбинированные двухтактные двигатели. // М.: Машиностроение. - 1968. – 576 с.
3. Круглов М.Г. Термодинамика и газодинамика двухтактных двигателей внутреннего сгорания. / М.: ГНТИМЛ – 1963. – 272 с.
4. Круглов М.Г., Ивин В.И., Исследование газообмена наддува и условий смесеобразования комбинированного двухтактного дизеля большой мощности на модели //Изв. вузов. Машиностроение. - 1966, - №10. – С.78–81
5. Круглов М.Г., Карелин А.Н., Строганов Е.К. Оценка допустимых отклонений от полного подобия при моделировании процессов в импульсной системе наддува двигателя. // Труды МВТУ “Комбиниров. двигатели внутреннего сгорания”, вып. 3, 1979.
6. Круглов М.Г., Меднов А.А., Стрелков В.П. Определение параметров моделирования газообмена на физической модели //Известия ВУЗов. Машиностроение N 12, 1977.
7. Круглов М.Г., Чистяков В.К. Применение метода газогидравлической аналогии для исследования выпуска и выпускных систем комбинированных двигателей внутреннего сгорания // Известия ВУЗов. Машиностроение N 6, 1970.

8. Стрелков В.П., Круглов М.Г., Агапитов О.Н., Костарев И.В., Петров Ю.В. Установка с объемной гидродинамической моделью для исследования газообмена двухтактных двигателей внутреннего сгорания // Каталог “Машины, приборы, стенды”, - № 8. – М.: изд. МВТУ. - 1982.
9. Круглов М.Г., Стрелков В.П., Агапитов О.Н., Березин С.Р. Объемная жидкостная модель для исследования газообмена комбинированного двухтактного двигателя // Известия ВУЗов. Машиностроение N 7, 1983.
10. Ивин В.И., Васильев Л.А., Возчиков С.М. Экспериментальное исследование потока в выпускном канале ДВС // Изв. вузов. Машиностроение. - 1975, - №12. – С.81-85
11. Ивин В.И., Васильев Л.А., Возчиков С.М. Определение параметров газа в граничном сечении на входе в выпускной трубопровод ДВС //Н. т. Сб. ДВС, вып. 25. –Харьков: Изд-во “Выща школа”. ХГУ - 1977. – С. 49-56
12. Круглов М.Г., Ивин В.И., Переездчиков И.В., Чистяков В.К. Экспериментальная установка для исследования газообмена в двухтактных двигателях внутреннего сгорания// Известия вузов. Машиностроение. 1972, №11.- С.82 – 84
13. Ивин В.И., Грехов Л.В. Установка для исследования нестационарного течения и локального теплообмена в ДВС // Изв. вузов. Машиностр. - 1981, №9. – С.78-82
14. Грехов Л.В. Электронный генератор цуга световых импульсов для газодинамических исследований // Машины, приборы, стенды: Каталог МВТУ, Вып. 7. 1980.
15. Ивин В.И., Грехов Л.В., Круглов М.Г. Применение метода стробоскопич. визуализации // Двигателестр., - 1983, №9. - С. 9-11
16. Ивин В.И., Грехов Л.В. Стенд для изучения течения и турбулентности в сложных нестационарных газовых потоках методом стробоскопической визуализации. // Машины, приборы, стенды: Каталог МВТУ. – 1986. – вып. 10. – С. 33 – 34.
17. Ивин В.И., Грехов Л.В. Исследование турбулентности в цилиндре двигателя внутреннего сгорания кинематическим методом // Изв. вузов. Машиностроение. – 1981. - №11. – С. 90-93.
18. *Ивин В.И., Грехов Л.В. Структура потока в выпускных каналах ДВС. //Двигателестроение. – 1981. - №8. – С. 8-10.*
19. Ивин В.И., Грехов Л.В. Экспериментальное исследование течения в выпускном канале ДВС // Двигателестроение. - 1985, №11. - С. 57-60
20. Ивин В.И., Васильев Л.А. Структура и интегральные характеристики потока в выпускном канале ДВС //Двигателестроение, №1. - 1985. – С. 57-60
21. Ивин В.И., Васильев Л.А., Возчиков С.М., Грехов Л.В. Влияние конфигурации клапана на геометрические и аэродинамические характеристики выпускного канала // НИИинформтяжмаш, 4-75-15.- С. 28-32
22. Возчиков С.М., Грехов Л.В., Ивин В.И. Вопросы профилирования выпускных каналов ДВС. // Труды МВТУ, №279. – выпуск 1. – 1978. - С. 61-71
23. *Ивин В.И., Грехов Л.В. Профилирование выпускных каналов дизеля. // Сб. Н.Т., Хаб. ПИ. – 1979. – С. 64-72.*
24. Ивин В.И., Лашко В.А. Физическое моделирование потока в преобразователе импульсов КДВС //Изв. вузов. Машиностроение. - 1978, №3. – С. 73-76
25. Грехов Л.В., Чайнов Н.Д., Ивин В.И. Опыт использования поверхностных термоприемников. // Двигателестроение. - 1981, №10.- С. 6-8
26. Методические особенности измерения местной температуры газа в выпускном канале // Двигателестроение. - 1986, №7. - С. 47-50
27. Ивин В.И., Грехов Л.В. Теплообмен в выпускном канале ДВС с клапаном / Двигателестроение, - 1987, №4. – С. 3-4
28. Ивин В.И., Грехов Л.В. Теплоотдача в выпускном канале ДВС // Двигателестроение. - 1988, №12. –С. 6-8
29. Грехов Л.В., Ивин В.И. Расчет и управление тепловыми процессами в выпускной

- системе ДВС // Мотор-Симпо-88: Доклады 6 Международного симпозиума: ЧССР. Ч 3. 1988.
30. Круглов М.Г., Стрелков В.П., Саркисян, Меднов А.А. Установка для физического моделирования процессов в выпускных системах комбинированных двигателей // Известия ВУЗов. Машиностроение № 10, 1975.
 31. Круглов М.Г., Карелин А.Н., Строганов Е.К. Модель для исследования процессов в выпускной системе комбинированного двухтактного двигателя с импульсным наддувом // Известия ВУЗов. Машиностроение, № 4. - 1968.
 32. **Маслов Ю.Л., Гришин Ю.А., Савенков А.М. Динамическая одноцикловая модель для исследования выпускных систем двухтактных двигателей // Межвуз. науч.-техн. сб. "Двигатели внутреннего сгорания". Вып. 7. - М.: МАМИ. - 1980.**
 33. Ивин В.И., Козлов В.И., Рындин В.В. Одноцикловая установка для моделирования неустановившегося потока во впускном тракте КДВС. // Изв. вузов. Машиностроение. - 1977, - №3. – С. ?
 34. Ивин В.И., Козлов В.И., Рындин В.В. Установка для физического моделирования неустановившегося потока во впускном тракте КДВС // Изв. вузов. Машиностроение. - 1977, №4. - С.112 - 115
 35. Ивин В.И., Рындин В.В. Исследование неравномерности наполнения цилиндров двигателя // Изв. вузов. Машиностр. 1981, №10. - С.71-73
 36. Ивин В.И., Рындин В.В. Нестационарный поток в разветвлениях впускных трубопроводов ДВС // Изв. вузов. Машиностр. - 1976, №9. - С.100-105
 37. Ивин В.И., Пурцхванидзе Г.Н. Эффекты нестационарности потока в разветвлениях впускного трубопровода // Изв. вузов. Машиностр. - 1991, №9. - С. 40–42
 38. Круглов М.Г., Ивин В.И., Стрелков В.П. Модель для исследования газообмена в двухтактном двигателе с противоположно движущимися поршнями // Изв. вузов. Машиностроение. - 1966, - №8. – С.54 –57
 39. Круглов М.Г., Ложкин М.Н. Аэродинамическая схема газового потока в цилиндре двухтактного двигателя с прямоточной схемой газообмена в период продувки-наполнения и принудительного выпуска // Известия ВУЗов. Машиностроение , - 1971.-№1.
 40. Круглов М.Г., Ивин В.И., Ложкин М.Н. Экспериментальное исследование аэродинамики цилиндра двухтактного двигателя с прямоточной схемой газообмена на модели. // Известия вузов, Машиностроение. 1971, №6. – С. 89-94
 41. Миронов А.П. Исследование процесса смесеобразования в вихрекамерных дизелях. Двигатели внутреннего сгорания // Под ред. Орлина А.С. Труды МВТУ. Вып. 83. ГНТИ. 1958.:
 42. Камзолов Е.П. Исследование процесса воспламенения и сгорания топлива при испарении его с нагретой поверхности // Известия ВУЗов, Машиностроение , - 1961.-№4.
 43. Леонов О.Б., Камзолов Е.П. Исследование пленочного смесеобразования // Известия ВУЗов. Машиностр. - № 1. - 1961.
 44. *Вырубов Д.Н., Камзолов Е.П. Исследования смесеобразования в дизелях. //Сб. "Двухтактные комбинированные поршневые двигатели". - Под ред. Орлина А.С., Струнге Б.Н. – М.: Изд-во "Машиностроение". - 1966*
 45. Вырубов Д.Н., Алексеев В.П. Физические основы процессов в камерах сгорания // Учебное пособие по курсу: "Теория рабочих процессов комбинированных ДВС" РИО МВТУ, 1977. 84 с.
 46. Давыдков Б.Н. Исследование воздушных потоков в камерах сгорания дизелей при организации вращения заряда вокруг оси цилиндра // Труды НАТИ. Выпуск 173, ОНТИ НАТИ, Москва, 1964.

47. Давыдков Б.Н., Володин В.М. К вопросу о воздушных потоках, возникающих в камерах сгорания при движении поршня // Труды НАТИ. Выпуск 173, ОНТИ НАТИ, Москва, 1964.
48. Давыдков Б.Н. Исследование воздушных потоков в камерах сгорания дизелей с непосредственным впрыском топлива // Тракторы и сельхозмашины, -1964. -№7.
49. Вырубов Д.Н., Арапов В.В. Измерения скоростей движения воздушного заряда в цилиндре двигателя // “Двигатели внутреннего сгорания”. Сборник работ, посвященный памяти Л.К.Мартенса. - Л.: “Машиностроение”. - 1965.
50. Воронов Г.Г., Назаров А.В., Приходько А.М. Установки для исследования единичных рабочих циклов в дизелях // Известия ВУЗов. Машиностроение. -1977. -№ 5.
51. Алексеев В.П., Приходько А.М. Расчетное и экспериментальное определение характеристики сгорания топлива в дизеле // Изв. ВУЗов, Машиностроение. -1976. -№ 4.
52. Кинофильм – «Процессы смесеобразования и сгорания в дизелях». // МВТУ им. Н.Э.Баумана. – Кафедра Поршневые двигатели
53. Вырубов Д.Н. Обзор работ кафедры Э-2 по исследованию смесеобразования и сгорания в дизелях. // Тезисы докладов на Юбилейной научно - технической конференции факультета “Энергомашиностроение”. - Изд-во МВТУ. - 1967
54. Грехов Л.В., Иавщенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. Учебник для вузов.– М.: Легион-Автодата. – 2004. – 344 с., илл.
55. Ивин В.И., Грехов Л.В. Температура газа в выпускной системе двигателя внутреннего сгорания //Изв. вузов. Машиностроение. – 1985.- №4. – С. 67-72
56. Леонтьев А.И., Ивин В.И. Грехов Л.В. Полуэмпирический метод оценки теплообмена за точкой отрыва Инж.-физический журнал. - 1984.- Т.47. - №4. - С. 543-550.
57. Ивин В.И., Грехов Л.В. Расчет течения с отрывом пограничного слоя в канале ДВС //Изв. вузов. Машиностроение. – 1985.- №2. – С. 68-72