

## УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВИХРЕВОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

С.П. Кулманаков, В.А. Калинин, А.В.Шашев

*В данной статье рассматриваются материалы исследований рабочего процесса быстрого малоразмерного вихрекамерного дизельного двигателя семейства ВАЗ. Разработаны рекомендации по совершенствованию мощностных и экономических показателей.*

*Ключевые слова:* дизель, рабочий процесс, вихревая камера сгорания.

В настоящее время все большее распространение получают дизельные двигатели, что объясняется их экономичностью и высокими экологическими характеристиками. Диапазон мощностей предлагаемых дизельных двигателей составляет от единиц киловатт до мегаватт. Широкий диапазон мощностей и частот вращения предполагает различные типы смесеобразования.

Общей особенностью процессов смесеобразования дизельных двигателей является их внутрицилиндровый характер за ограниченный промежуток времени вблизи верхней мертвой точки (ВМТ). При этом после самовоспламенения процессы топливоподачи, развития топливного факела, прогрев, испарение и смешение капель топлива с воздухом совмещаются с горением топливо-воздушной смеси.

Смесеобразование начинается практически в момент начала топливоподачи и продолжается практически до момента открытия выпускных клапанов. Развитие и качество смесеобразования определяется параметрами топливоподачи, организацией турбулентного движения заряда в камере сгорания, свойствами топлива и заряда, формой, размерами и температурами поверхностей камеры сгорания, расположением топливных факелов относительно поверхностей камеры сгорания и взаимодействием топливных струй и воздушного заряда.

Смесеобразование в значительной мере определяет характер формирования процесса тепловыделения и предопределяет мощностные, экономические и экологические параметры рабочего процесса.

В связи с этим к смесеобразованию предъявляются следующие требования:

- ограничение количества смеси, приготавливаемой за период задержки самовоспламенения и в начальный период видимого сго-

рания, для снижения «жесткости» рабочего процесса и уменьшения выбросов оксидов азота;

- обеспечение условий для полного и своевременного сгорания топлива с минимальными выбросами твердых частиц и токсичных компонентов (СО, С<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, NO<sub>x</sub>, и др.).

Для малоразмерных дизельных двигателей, работающих при высоких частотах вращения коленвала и ограниченных размерах камеры сгорания, более предпочтительно использование вихрекамерного и предкамерного смесеобразования.

К достоинствам данного типа смесеобразования следует отнести:

- высокое качество смесеобразования, характеризующее коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ ;

- улучшенные экологические и мощностные характеристики;

- низкая стоимость топливной аппаратуры;

- возможность использования топлив с ухудшенными моторными свойствами.

Однако наряду с преимуществами вихрекамерные и предкамерные двигатели обладают и недостатками, основные из которых – высокий расход топлива и плохие пусковые качества.

### Смесеобразование в разделенных камерах сгорания

Разделенные камеры сгорания (КС) состоят из вспомогательной и основной полостей, соединенных горловиной. В вихревой КС ось соединительной горловины направлена по касательной к внутренней поверхности сферической или цилиндрической вихревой камеры (рисунок 1), поэтому в ней создается направленное вихревое движение заряда. Скорость перетекания заряда через горловину и близкая к ней максимальная скорость движения заряда в вихревой камере дости-

## УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВИХРЕВОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

гают 100...200 м/с в зависимости от относительной величины объема вихревой КС ( $V_k/V_c$ ) и относительной величины проходного сечения горловины ( $f_r/F_n$ ). Топливо впрыскивается штифтовым распылителем в направлении, показанном на рисунке 1.

Впрыскиваемое топливо попадает на стенку аккумулятора тепла вихревой КС и растекается в виде пленки, затем взаимодействуя с интенсивно закрученным вихревым потоком. Данное взаимодействие помогает осуществлять пристеночного (пленочное) смесеобразования, то есть подвод окислителя к топливу. Температура горловины вихревой камеры может достигать до 600...650 °С. Взаимодействие интенсивного вихря и высокой температуры помогает обеспечить качественное смесеобразование с большой однородностью топливоздушной смеси (до  $\alpha \approx 1,2$ ).

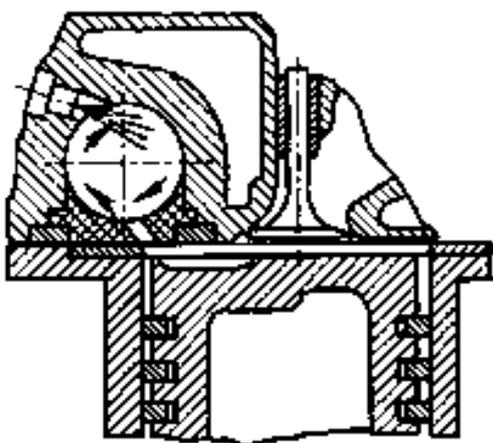


Рисунок 1 – Камера сгорания малоразмерного дизеля (показано направление движения заряда в вихревой камере)

С ростом частоты вращения тепловой режим вихревой КС и турбулизация, находящегося в ней заряда, возрастают, что ускоряет и улучшает смесеобразование. Так как обычно объем  $V_{вк} \leq (0,5...0,6)V_c$ , то в вихревой камере, куда подается вся цикловая порция топлива, на режимах больших нагрузок создается обогащенная смесь. Естественно, здесь невозможно полное сгорание топлива. Отсутствие избытка воздуха препятствует образованию оксидов азота. В результате воспламенения давление в вихревой камере повышается. Горящий заряд начинает перетекать во вторую (основную) полость КС, выполненную в виде фасонной выемки на поршне, где сосредоточена значительная

часть еще не использованного для сгорания воздуха. При правильном выборе формы и расположения обеих полостей камеры сгорания и горловины в основной полости происходит быстрое и качественное смесеобразование и полное догорание топлива.

Организация интенсивного движения воздушного заряда, действие горячих поверхностей и истечение горячих газов из дополнительной в основную КС при вихрекамерном смесеобразовании позволяют применять топливоподающую аппаратуру с небольшими давлениями впрыскивания. Особенно это важно для дизелей малой размерности, в которых небольшие цикловые подачи топлива не позволяют получить высокое качество процесса смесеобразования. Двигатели с данными КС обеспечивают достаточно полное сгорание топлива при сравнительно низком коэффициенте избытка воздуха ( $\alpha = 1,3...1,4$ ).

В двигателях с неразделенными КС организуется объемное смесеобразование, при котором топливо впрыскивается в камеру, форма которой согласуется с формой топливных факелов и количеством сопловых отверстий форсунки. Равномерное распределение топлива по объему КС достигается при этом благодаря повышенным давлениям впрыскивания топлива (до 200 МПа и выше) и организации вихревого движения заряда. Эффективное сгорание топлива в таких двигателях обеспечивается при диаметре цилиндров большем 12-14 см и коэффициенте избытка воздуха  $\alpha > (1,5...1,6)$ . При этом небольшая поверхность КС способствует низким потерям тепла в стенку.

Компромиссным конструктивным решением между разделенными и неразделенными камерами являются полуразделенные КС. В двигателях с полуразделенной КС обычно организуются пленочное смесеобразование и рабочий процесс, названный М-процессом. В таких двигателях топливо впрыскивается на стенку КС, а смесеобразование осуществляется вследствие медленного испарения топливной пленки с относительно холодной стенки. Количество топлива, образующего топливную пленку, сравнительно велико и зависит от угла встречи факела со стенкой и его структуры, вязкости топлива, ряда других факторов. Важную роль при таком типе смесеобразования играет интенсивное вращательное движение воздушного заряда, создаваемое в цилиндре. Из-за медленного испарения к началу воспламенения количество топливоздушной смеси оказывается не-

большим. Воспламенение происходит от незначительной дозы (5...10%) топлива, попадающего в распыленном состоянии в центр КС в поршне. Остальная часть топлива воспламеняется от этой «запальной» дозы. В результате сгорание происходит с меньшими скоростями нарастания давления, чем при объемном смесиобразовании.

**Основные преимущества и недостатки разделенных камер сгорания**

**Преимущества вихревых КС:**

Применение дизелей с разделенными КС позволяет снизить концентрацию в ОГ основных нормируемых токсичных компонентов по сравнению с неразделенными КС. Меньшее содержание оксидов азота в ОГ дизелей с разделенной КС связано с дефицитом свободного кислорода на первой стадии сгорания при  $\alpha < 1$ , когда происходит интенсивное образование  $NO_x$ . Поэтому, несмотря на высокие температуры в дополнительной КС, процесс окисления азота воздуха ограничивается. Во второй стадии сгорание смеси в основном объеме КС происходит при избытке кислорода, но при пониженных по сравнению с дизелями с неразделенными КС температурах. Невысокие концентрации продуктов неполного сгорания ( $CO$ ,  $C_xH_y$ , сажа) в ОГ дизелей с разделенными КС связаны с ускорением реакции окисления частиц топлива при повышенной турбулизации топливовоздушной смеси в объеме дополнительной КС, где достигается максимальная гомогенность факела, при перетекании газов в основную КС и в объеме последней с интенсивным вихреобразованием. Поэтому применение разделенных КС приводит к уменьшению эмиссии основных нормируемых токсичных компонентов в ОГ в 1,5-3 раза практически на всех эксплуатационных режимах работы дизеля. Об этом свидетельствуют данные по токсичности ОГ ряда зарубежных (рисунок 2) и отечественных (рисунок 3) дизельных двигателей транспортного назначения.

Небольшая скорость нарастания давления в основной КС и, как следствие, малое шумоизлучение от процесса сгорания, что совершенно необходимо, исходя из комфорта пассажиров. Малая продолжительность периода задержки воспламенения в градусах поворота коленчатого вала при увеличении частоты вращения и, как следствие, сохранение практически неизменной доли смеси, приготовленной за период задержки воспламенения, что важно из-за широкого диапазона рабочих частот вращения ( $n = 1000...4500 \text{ мин}^{-1}$ ).

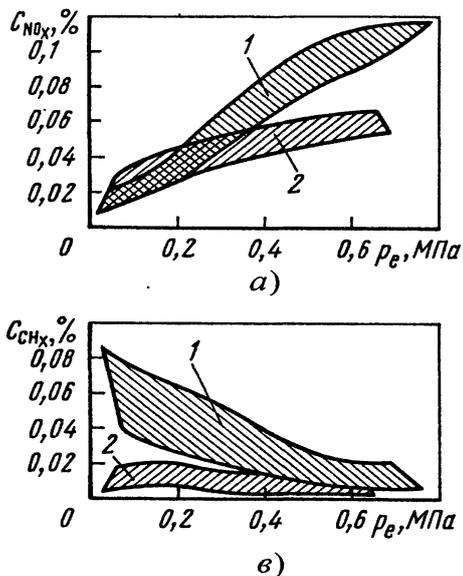


Рисунок 2 - Зависимости содержания оксидов азота  $C_{NO}$  (а) и углеводородов  $C_{CH}$  (б) в ОГ от нагрузочного режима работы для дизелей фирмы «Deutz» (Германия): 1- дизель F12L413 с непосредственным впрыском, работающий на режимах при  $n = 1000-2500 \text{ мин}^{-1}$ ; 2- дизель F8L413 с разделенной КС, работающий на режимах при  $n = 1000-2650 \text{ мин}^{-1}$

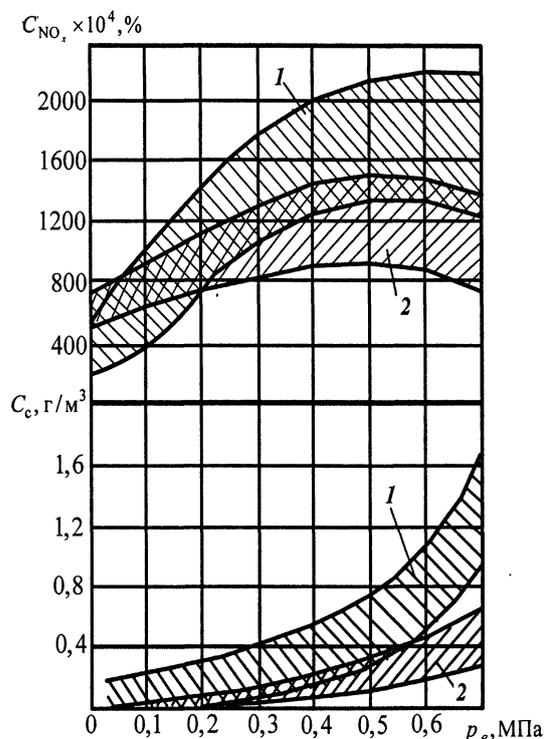


Рисунок 3 - Обобщенные зависимости концентраций оксидов азота  $C_{NO}$  и сажи  $C_s$  в ОГ от нагрузочного режима работы отечественных транспортных дизелей: 1-с неразделенной КС; 2- с разделенной КС

## УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВИХРЕВОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

Для вихрекамерных дизелей характерно применение относительно несложных и недорогих систем впрыскивания топлива в цилиндры, вследствие низких требований к качеству распыливания топлива.

Высокое значение степени сжатия ( $\epsilon$  до 25) и повышенная температура камеры сгорания снижают требования к воспламеняемости применяемых топлив, что позволяет использовать менее качественные, а также альтернативные топлива.

### Недостатки вихревых КС

Высокий удельный расход топлива, а следовательно, и высокие выбросы в атмосферу диоксида углерода. Высокий  $g_e$  является следствием энергетических потерь на перетекание заряда между обеими полостями камер сгорания через узкую соединительную горловину и больших потерь теплоты в среду охлаждения из-за развитой поверхности теплообмена и больших скоростей заряда. Вследствие этого увеличение расхода топлива может достигать до 5...10% по сравнению с дизелями с неразделенной и полуразделенной камерой сгорания.

Плохие пусковые качества дизеля являются следствием попадания значительной части топлива на холодную стенку дополнительной камеры, больших потерь теплоты в среду охлаждения и меньших давлений в дополнительной камере из-за дросселирования потока, перетекающего из основной камеры.

Вихрекамерные дизели обладают более низкими показателями по форсированию из-за высокого давления конца сжатия, вследствие высоких значений степени сжатия, и повышенной теплонапряженности деталей цилиндро-поршневой группы из-за более богатой смеси.

Конструктивным недостатком дизелей с разделенными КС является усложнение конструкции головки.

Вследствие указанных причин разделенные КС применяются в основном в дизелях малой мощности (для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков), а неразделенные КС - в дизелях средней и большой мощности (для грузовых автомобилей, автобусов и т.д.).

### Экспериментальная установка.

#### Методика исследования

Базой исследований являлась оригинальная комплексная лабораторная установка созданная и размещенная в лаборатории кафедры ДВС Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

При проведении исследований, монтаже оборудования, приборов, отборе проб отработавших газов, обработке результатов измерений и их анализе учитывались требования соответствующих ГОСТов.

### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, приведенная на рисунках 4 и 5, представляет собой комплекс следующих конструкций и систем:

1. Собственно двигатель со вспомогательными системами
2. Система датчиков и устройств контроля параметров работы двигателя
3. Автоматизированная система сбора и обработки информации с датчиков.
4. Пульт управления установкой.

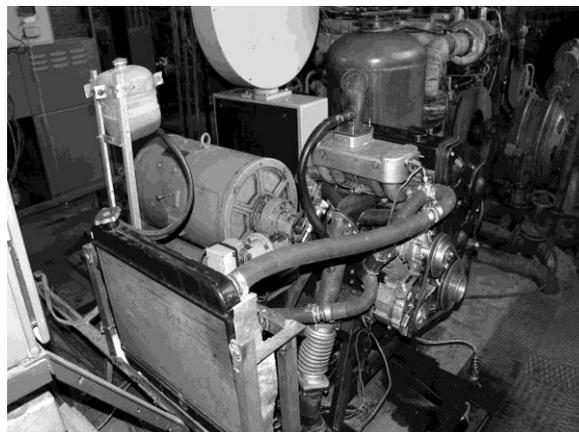


Рисунок 4 - Общий вид нагрузочного стенда с установленным дизелем ВАЗ



Рисунок 5 - Общий вид пульта управления

1. Экспериментальный двигатель представляет собой малоразмерный быстроходный вихрекамерный дизель семейства ВАЗ. Двигатель укомплектован масляным, топливным насосом высокого давления распределительным устройством.

тельного типа фирмы «Bosch», разделенной камерой сгорания вихревого типа.

Для запуска, прокрутки, торможения и измерения крутящего момента дизеля ВАЗ используется балансирующий электродинамометр постоянного тока типа LPA-50, мощностью 50 кВт при  $6000\text{мин}^{-1}$ , оснащенного весовым устройством «Rapido».

Система охлаждения двигателя ВАЗ автономная термостатированная с возможностью автоматического поддержания постоянной температуры охлаждающей жидкости.

2. Для контроля частоты вращения применен электронно-счетный тахометр ТЦ-3М, с погрешностью измерения 0,2 %.

Система выхлопа оснащена газоотводящими устройствами с приборными зондами в соответствии с требованиями ОСТ 23. 1. 441 – 76 и ОСТ 23. 1. 440 – 76 для отбора и анализа ОГ на содержание токсичных компонентов. Содержание токсичных компонентов в отработавших газах измерялась с помощью лабораторного газоанализатора «Quintox-9106» производства Великобритании. Регистрировались в отработавших газах следующие компоненты: окислы азота  $\text{NO}_x$ , углеводороды  $\text{C}_x\text{H}_y$ , оксид серы  $\text{SO}_2$ , окись углерода  $\text{CO}$ , также измерялось содержание свободного кислорода  $\text{O}_2$ .

Для регистрации параметров топливоподачи установка была оборудована индуктивным датчиком подъема иглы форсунки и пьезометрическим датчиком давления топлива, расположенным на штуцере ТНВД.

В процессе исследований проводились замеры эффективного крутящего момента, расхода дизельного топлива с помощью электронного расходомера, расхода воздуха, температуры отработавших газов, охлаждающей воды и смазки.

3. Для анализа параметров рабочего процесса (давления, температуры, тепловыделения и др.) и топливоподачи проводилась регистрация и запись для последующей обработки давления внутри цилиндра и параметров топливоподачи. С этой целью в данной исследовательской установке была применена модульная система многоканального стендового контрольно-измерительного устройства Н-2000 с соответствующими датчиками и аналого-цифровыми преобразователями, оснащенная программным пакетом АСТest, в состав которого входили модули эксперимента, последующей обработки и метрологического обеспечения (рисунки 6 и 7).

4. Система автоматического индциро-

вания двигателя на основе микроЭВМ регистрирует следующие параметры:

- положения коленчатого вала;
- регистрация текущего давления в вихревой камере сгорания двигателя;
- регистрация текущего давления в основной камере сгорания двигателя;
- регистрация текущего давления топлива после насоса высокого давления;
- регистрация подъема иглы форсунки;
- регистрация текущего давления воздуха во впускном коллекторе;
- регистрация текущего давления в выпускном коллекторе.

5. Пульт управления, изображенный на рисунке 5, позволяет осуществлять запуск, контроль, регулировку режима работы двигателя и контролировать основные характеристики работы дизеля.



Рисунок 6 - Пьезодатчики установленные во впускной и выпускной коллекторы



Рисунок 7 - Пьезодатчик, установленный в вихревую камеру сгорания

## УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВИХРЕВОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

### Результаты и анализ полученных данных

При испытаниях были выбраны следующие режимы работы двигателя:

1. Нагрузочная характеристика при частоте вращения  $2500 \text{ мин}^{-1}$  (режим максимального крутящего момента);
2. Нагрузочная характеристика при частоте вращения  $4000 \text{ мин}^{-1}$  (режим максимальной мощности двигателя);
3. Внешняя скоростная характеристика.

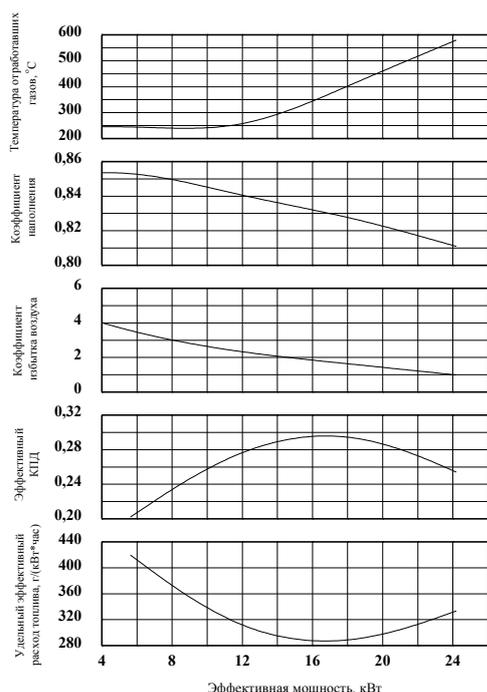


Рисунок 8 - Нагрузочная характеристика при частоте вращения  $2500 \text{ мин}^{-1}$

Данные режимы были выбраны как наиболее характерные при эксплуатации и наиболее напряженные по тепловому и механическому состоянию деталей.

Сравнительный анализ нагрузочных характеристик при частотах вращения  $2500$  и  $4000 \text{ мин}^{-1}$  (рисунки 8 и 9) позволяет сделать следующие выводы:

1. Минимальный удельный эффективный расход топлива меньше при частоте вращения  $2500 \text{ мин}^{-1}$  составляет  $280 \text{ г/(кВт*час)}$ , а при частоте вращения  $4000 \text{ мин}^{-1}$  составляет около  $360 \text{ г/(кВт*час)}$ , что говорит о более худшей организации процесса сгорания на высоких частотах вращения. Наиболее вероятно, это связано с увеличением гидравлических потерь при перетекании заряда между основной и вихревой камерой сгорания.

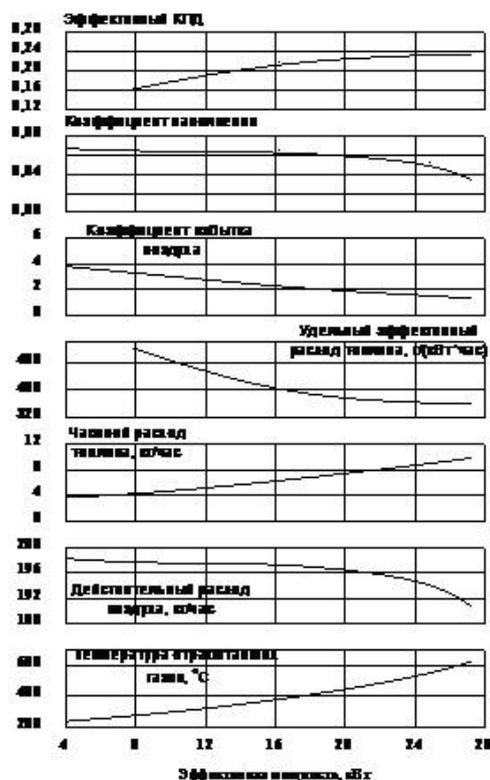


Рисунок 9 - Нагрузочная характеристика при частоте вращения  $4000 \text{ мин}^{-1}$

2. Коэффициент наполнения увеличивается с ростом частоты вращения, что говорит о настройке впускной системы на более высокую частоту вращения. В то же время диапазон изменения от  $0.81$  до  $0.85$  (в зависимости от нагрузки) позволяет сделать вывод о возможности его увеличения при доработке впускного коллектора и профиля каналов.

3. Температура отработавших газов при частоте вращения  $2500 \text{ мин}^{-1}$  изменяется от  $250$  до  $570 \text{ °C}$ , а при частоте вращения  $4000 \text{ мин}^{-1}$  – от  $220$  до  $620 \text{ °C}$ . Это связано с нехваткой времени как для полного сгорания вблизи ВМТ, так и отвода тепла охлаждающей жидкостью. При этом, максимальные значения не выходят из допустимого диапазона.

4. Достаточно низкие значения эффективного КПД, по сравнению с аналогичными двигателями, позволяет сделать вывод о возможности его дальнейшего улучшения, а соответственно, получить снижение удельного эффективного расхода топлива.

5. Низкие значения коэффициента избытка воздуха при максимальной мощности ( $\alpha \approx 1,1-1,2$ ) обуславливают значительное

дымление, повышенный расход топлива и перегрев клапанов и поверхностей камеры сгорания. При этом можно говорить о потенциальной возможности повышения эффективного КПД, снижении температуры отработавших газов и улучшения экологических показателей при увеличении коэффициента избытка воздуха на режимах близких к максимальной мощности.

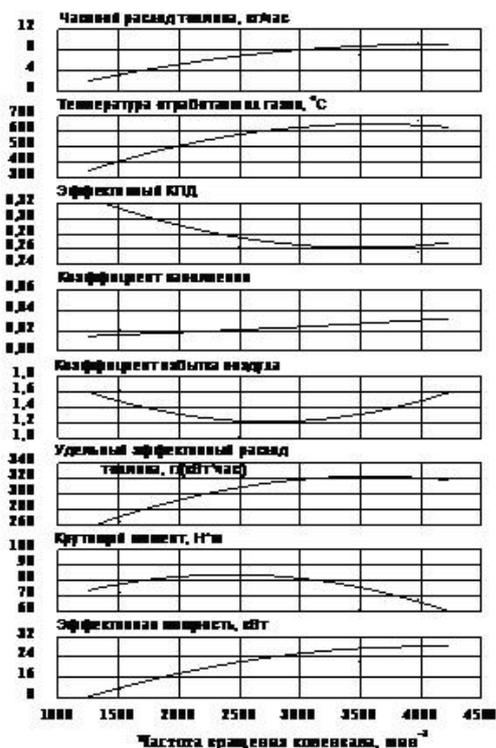


Рисунок 10 - Внешняя скоростная характеристика

Анализ внешней скоростной характеристики (рисунок 10) показывает:

1. С увеличением частоты вращения эффективный КПД падает, а удельный эффективный расход топлива возрастает, что говорит об увеличении внутренних потерь при сгорании.

2. Коэффициент наполнения увеличивается с возрастанием частоты вращения, что подтверждает вывод о настройке впускной системы на режим максимальной мощности.

3. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  имеет минимальное значение в районе 2500–3000 мин<sup>-1</sup>, что говорит о несогласованности настроек топливной аппаратуры и системы впуска.

4. Максимальные значения температуры отработавших газов достигают 650–670°C при частоте вращения около 3500 мин<sup>-1</sup>, что заставляет уделить внимание снижению теплонапряженности деталей.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании анализа нагрузочных и внешней скоростной характеристик можно рекомендовать:

- оптимизировать соотношения объемов вихревой и основной камер сгорания, улучшить гидродинамику соединительного канала;
- доработать впускной коллектор для выравнивание наполнения по цилиндрам, провести проработку впускных каналов головки с учетом газодинамических особенностей потока; повысить качество поверхности каналов за счет внедрения более качественного литья;
- необходимо обеспечить снижение теплонапряженности камеры сгорания, возможен переход на другие материалы (композитные, металлокерамику);
- согласовать режимы топливной аппаратуры и впускной системы для увеличения эффективного КПД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильные двигатели: Рабочие циклы. Показатели и характеристики. Методы повышения эффективности энергопреобразования / В. Р. Бурячко, А. В. Гук. – СПб.: НПИКЦ, 2005. – 292 с.
2. Балагин В. И., Еремеев А. Ф. И Семенов Б. Н. Топливная аппаратура быстроходных дизелей.- Л.: Машиностроение, 1967.
3. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. Изд. второе, дополненное.- М.: «Колос», 1967.- 159 с.

**Кулманакон С.П.**, к.т.н., доц.  
**Калинин В.А.**,  
**Шашев А.В.**, к.т.н.,  
 АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул,  
 тел. (8385)260516, e-mail: [spk\\_ice@mail.ru](mailto:spk_ice@mail.ru)

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы (ФЦП)  
 «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы