

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПОЛУРАЗДЕЛЕННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ С ГАЗОТУРБИНЫМ НАДДУВОМ

*Е.А. Лазарев, В.Е. Лазарев*

## THE TEMPERATURE CONDITION OF THE AIR-FUEL MIXTURE INTO TURBO-CHARGED DIESEL ENGINE'S COMBUSTION CHAMBER

*E.A. Lazarev, V.E. Lazarev*

Определено температурное состояние рабочего тела в цилиндре и камере сгорания дизеля, обусловленное сгоранием топлива и движением газовой смеси. Отмечена температурная неоднородность рабочего тела и установлены области в объеме камеры сгорания с наиболее высокими температурами. Установлена связь распределения температур рабочего тела в объеме камеры сгорания с температурным полем поршня в районе кромки ее горловины.

*Ключевые слова:* рабочее тело, температурное состояние, вихревое движение, горловина камеры сгорания в поршне.

The temperature condition of the air-fuel mixture into diesel engine's combustion chamber is estimated in connection with combustion of the fuel and movement of the gas mixture. The non-regularity of the temperature of air-fuel mixture and volumes of combustion chamber with most high temperatures are defined. The interdependence of the distributions of the temperatures for air-fuel mixture and for the piston is evaluated and analyzed.

*Keywords:* air-fuel mixture, thermal condition, turbulence movement, piston's chamber of combustion.

**Введение.** При осуществлении процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре дизеля большое внимание уделяется движению воздушного потока, в значительной степени определяющему распределение топлива в камере сгорания, его прогрев, испарение, воспламенение, сгорание и, как следствие, распределение температур в горячей смеси. Важнейшей особенностью газодинамической обстановки в полуразделенных камерах сгорания является сложный характер вихревого движения воздуха, отличающийся наличием трех составляющих: радиальной, осевой и тангенциальной, каждая из которых формируется различными факторами.

От распределения температуры рабочего тела в объеме камеры сгорания в значительной степени зависит тепловое и напряженно-деформированное состояние головки поршня. Экспериментальные и расчетные исследования по оценке теплового состояния поршня свидетельствуют о неравномерном распределении температуры по поверхности камеры сгорания [1], одной из причин которого является температурное состояние рабочего тела.

**Особенности методики исследования.** В различных типах полуразделенных камер сгорания преобладает та или иная составляющая воздушного потока [2]. Характерным представителем полуразделенных камер сгорания является камера сгорания типа ЦНИДИ, конструкция и размещение в цилиндре которой, а также особенности движения воздуха в ней при перемещении поршня от НМТ к ВМТ представлены на рис. 1. Наличие зауженной горловины обеспечивает преобладание радиальной составляющей вихревого движения воздуха в камере сгорания, выражающееся в образовании так называемого торообразного вихря.

Анализ температурного состояния рабочего тела в цилиндре и камере сгорания дизеля осуществлялся с использованием технологии CFD, реализованной в программном комплексе FIRE

фирмы AVL (Австрия, г. Грац) и обладающей широкими возможностями для трехмерного моделирования динамических процессов в топливной струе и рабочем газе методом конечных объемов. Программный комплекс используется в учебных и научных целях в соответствии со специальным соглашением о творческом сотрудничестве между фирмой AVL и Южно-Уральским государственным университетом.

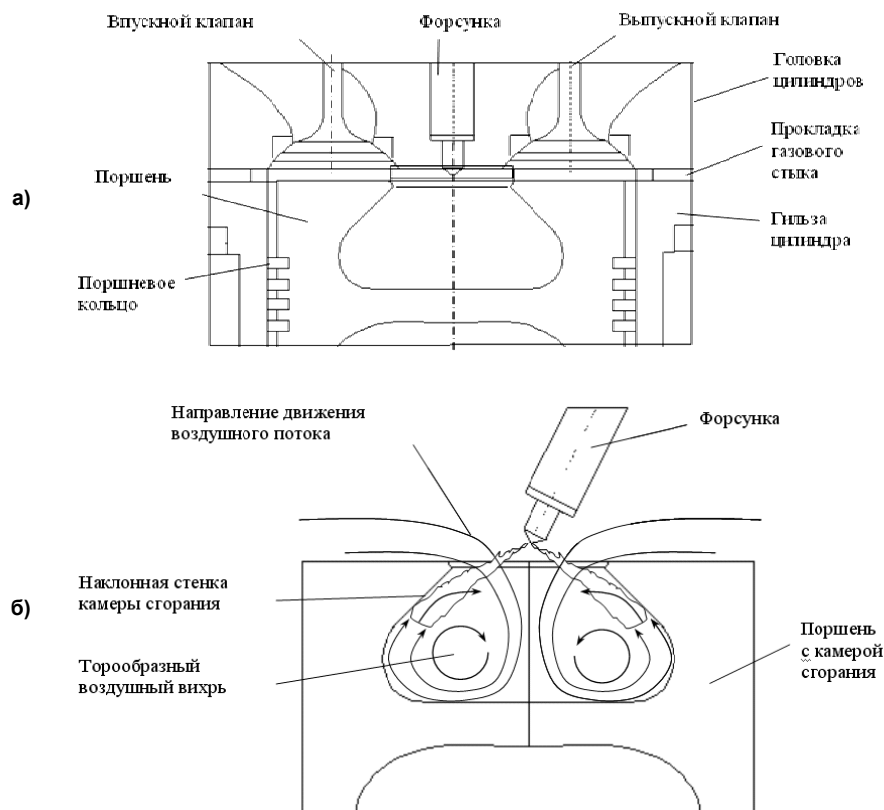


Рис. 1. Элементы, образующие внутрицилиндровое пространство дизеля (а), схема движения воздуха (б) и образования топливной пленки на наклонной стенке камеры сгорания ЦНИДИ при впрыскивании

В статье рассмотрено изменение температурного состояния рабочего тела в цилиндре и камере сгорания в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ) дизеля 4ЧН15/20,5, работающего на режиме номинальной мощности при значениях среднего эффективного давления  $P_e = 0,87$  МПа и частоты вращения коленчатого вала  $n = 1250$  мин<sup>-1</sup>. В этих целях составлена пространственная конечно-объемная модель сегмента камеры сгорания в пространстве сжатия внутри цилиндра дизеля, фрагмент которой представлен на рис. 2. С учетом равномерно расположенных по окружности пяти распыливающих отверстий распылителя топливной форсунки угол сегмента конечно-объемной модели в плоскости днища поршня составляет 72 град.

Состояние рабочего тела в цилиндре и камере сгорания дизеля оценивалось преимущественно в процессах сжатия, впрыскивания топлива, смесеобразования, сгорания и совмещенным с процессом сгорания расширением. Анализ температурного состояния рабочего тела выполнялся в плоскости, близкой к плоскости оси топливной струи в процессе ее развития.

**Результаты расчетного анализа.** Температурное состояние рабочего тела в цилиндре и камере сгорания представлено в совмещенном виде с индикаторной диаграммой давления  $P$  газов в цилиндре дизеля на рис. 2. Здесь же приведена зависимость средней температуры  $T$  газа от угла ПКВ  $\alpha$ .

При перемещении поршня к ВМТ в процессе сжатия давление и температура рабочего тела растут, причем распределение температуры по объему внутрицилиндрового пространства, включая объем камеры сгорания, относительно равномерное. Положение поршня на слайде 1 рис. 3 соответствует углу ПКВ – 300 град. При перемещении поршня к ВМТ (слайды 2 и 3 рис. 3)

## Расчет и конструирование

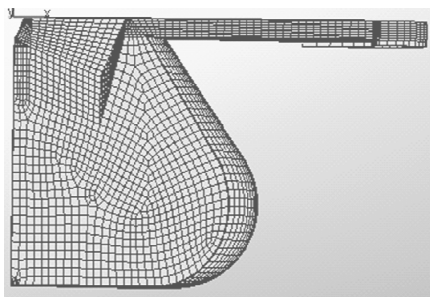


Рис. 2. Фрагмент пространственной конечно-объемной модели сегмента камеры сгорания в пространстве сжатия внутри цилиндра дизеля

температура рабочего тела возрастает, сохраняя относительно равномерное распределение ее по объему внутрицилиндрического пространства.

Положение поршня на слайде 3 рис. 3 характеризуется началом впрыскивания топлива, видно появление топливного факела на выходе из распыливающего отверстия распылителя топливной форсунки. Примерно через 5 град ПКВ после начала впрыскивания топлива происходит самовоспламенение топливных паров, и температурное состояние рабочего тела характеризуется появлением локальной (очаговой) области с повышенной (до 1000–1300 К) температурой (слайд 4 рис. 3).

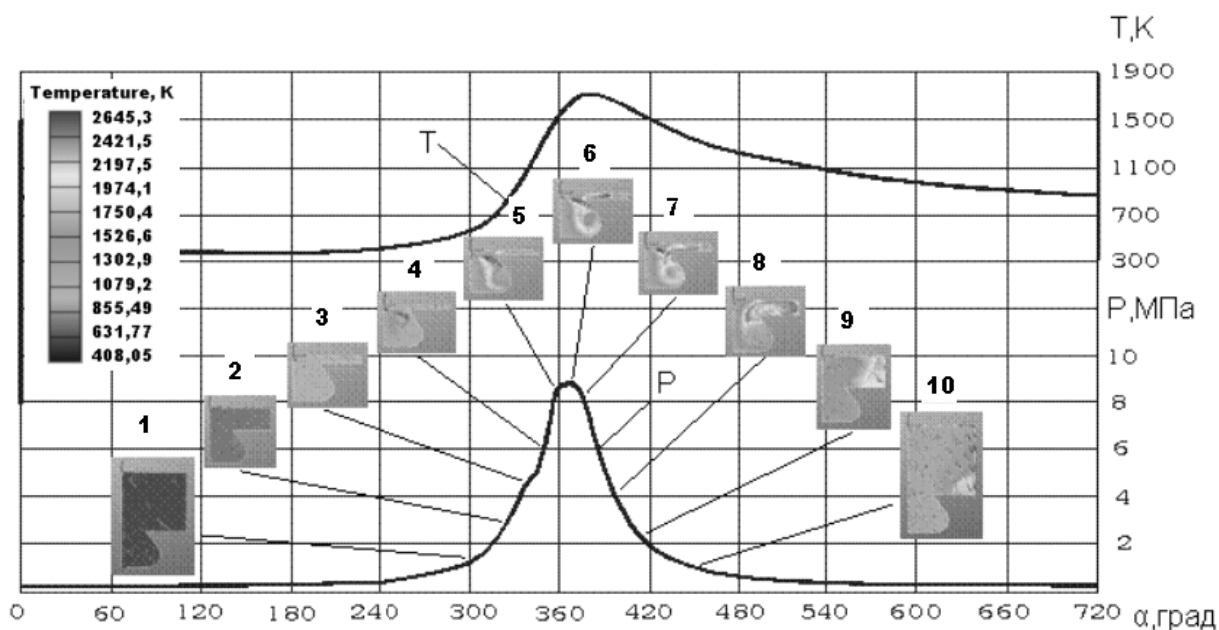


Рис. 3. Изменение давления, температуры в цилиндре и температурное состояние смеси в камере сгорания в зависимости от угла ПКВ дизеля ( $P_e = 0,87$  МПа,  $n = 1250$  мин<sup>-1</sup>)

По мере распада топливной струи и развития процесса ее выгорания очаговая область повышенной температуры трансформируется, приобретая кольцевую форму, и развивается в сторону наклонной стенки под действием торообразного вихревого движения рабочего тела, направленного внутрь камеры сгорания. При дальнейшем перемещении поршня к ВМТ (слайд 5 рис. 3) температура очаговой области продолжает непрерывно расти и достигает максимального значения в районе горловины камеры сгорания, в частности, на стороне ее кромки, обращенной к поверхности головки цилиндров.

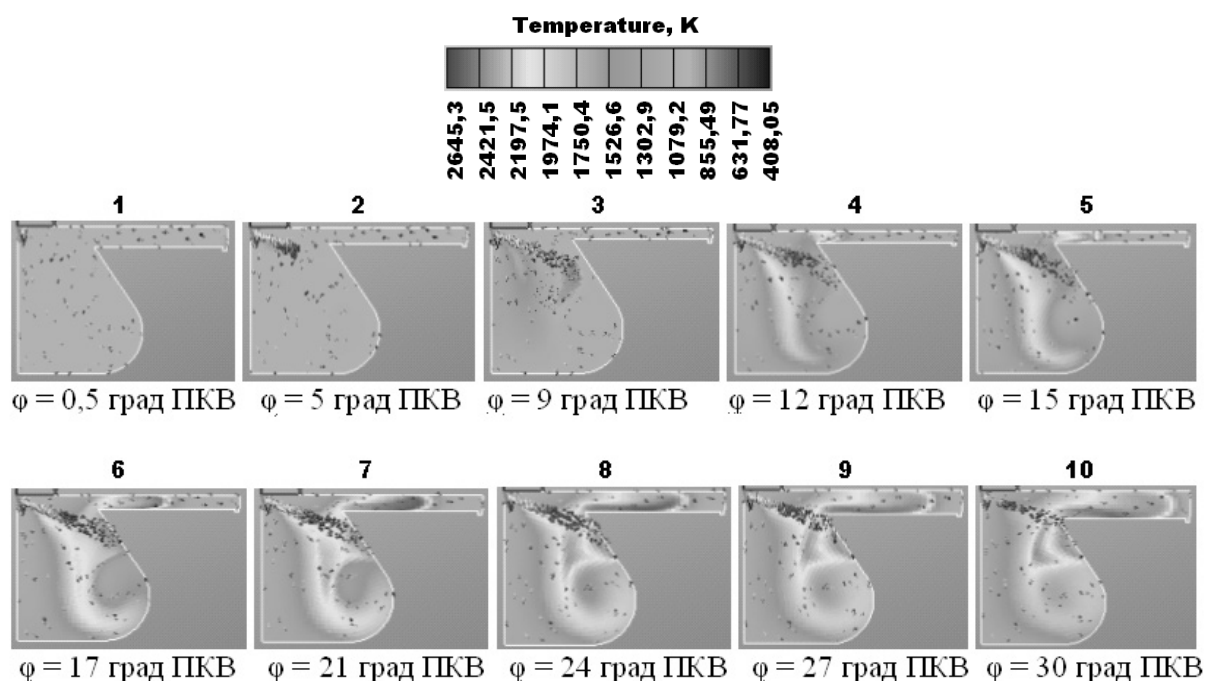
После изменения направления движения поршня к НМТ (слайды 6 и 7 рис. 3) начинается процесс истечения газовой смеси из камеры сгорания, и очаговая область распространяется в увеличивающемся надпоршневом зазоре между днищем поршня, перемещающегося к НМТ, и поверхностью головки цилиндров. При дальнейшем движении поршня к НМТ область повышенной температуры достигает внутренней поверхности гильзы цилиндра (слайд 8 рис. 3). Медленное завершение выгорания топливных паров обуславливает постепенное снижение неоднородности и выравнивание температурного поля сначала в камере сгорания, а затем и в цилиндре (слайды 9 и 10 рис. 3).

Интересно проследить развитие топливной струи и изменение газодинамической обстановки в камере сгорания в процессе впрыскивания топлива, продолжительность которого на режиме номинальной мощности исследуемого дизеля составляет 30 град ПКВ (рис. 4). Для более различимой визуализации процесса развития топливной струи при впрыскивании размер капель топлива на приведенных слайдах условно увеличен в 10 раз.

Через 5 град ПКВ после начала впрыскивания (слайд 1 рис. 4) струя топлива проходит почти половину расстояния до наклонной поверхности камеры сгорания в поршне (слайд 2 рис. 4). Затем струя топлива начинает распадаться на отдельные капельки, интенсивно прогреваясь и испаряясь (слайд 3 рис. 4). Нагретые пары топлива образуют след области повышенной температуры, увлекаемой радиальным торообразным вихрем в глубину камеры сгорания с образованием на ее кромке зарождающегося высокотемпературного очага (слайд 4 рис. 4).

Продолжающийся распад все возобновляемой топливной струи вследствие поступления новых порций топлива из распыливающего отверстия увеличивает объем паровой фазы топлива, охватываемый областью повышенной температуры. При изменении направления движения поршня к НМТ на кромке камеры сгорания наблюдается увеличение очагового повышения температуры (слайды 5 и 6 рис. 4). К моменту окончания процесса впрыскивания топлива высокотемпературная область расширяется вдоль надпоршневого зазора к поверхности гильзы цилиндра, одновременно опускаясь вглубь камеры сгорания и охватывая кромку ее горловины с обеих сторон (слайды 7, 8 и 9 рис. 4).

Замечено, что движение воздушного вихря оказывает незначительное влияние на развитие топливной струи при впрыскивании топлива, лишь незначительно отклоняя ее вглубь исследуемой камеры сгорания.



**Рис. 4. Изменение температурного состояния рабочего тела в камере сгорания в зависимости от угла ПКВ дизеля за период впрыскивания топлива ( $P_e = 0,87$  МПа,  $n = 1250$  мин<sup>-1</sup>)**

На рис. 5, а представлено распределение температуры в рабочем теле в конце впрыскивания топлива, которое получено расчетом с использованием технологии CFD методом конечных объемов. Температурное поле поршня исследуемого дизеля с полуразделенной камерой сгорания, полученное расчетом с использованием метода конечных элементов, представлено на рис. 5, в.

Наибольшее значение температуры поршня наблюдается на кромке горловины камеры сгорания. Причем изотермы в районе кромки горловины располагаются почти перпендикулярно биссектрисе угла, ее образующего, а направление теплового потока от кромки совпадает с направлением этой биссектрисы. На поверхности камеры сгорания минимальная температура наблюдается на ее днище.

Если оценить характер распределения температур по сечению камеры сгорания в поршне и особенности распределения температур в газовой смеси, омывающей эти поверхности, то можно заметить достаточно близкое их совпадение (рис. 5, б). В этой связи можно считать, что распре-

## Расчет и конструирование

деление температуры по поверхности камеры сгорания в поршне определяется распределением температуры рабочего тела в объеме и вблизи этих поверхностей. Распределение температуры рабочего тела в объеме и вблизи этих поверхностей, в свою очередь, в основном зависит от характера движения воздушного вихря в объеме камеры сгорания.

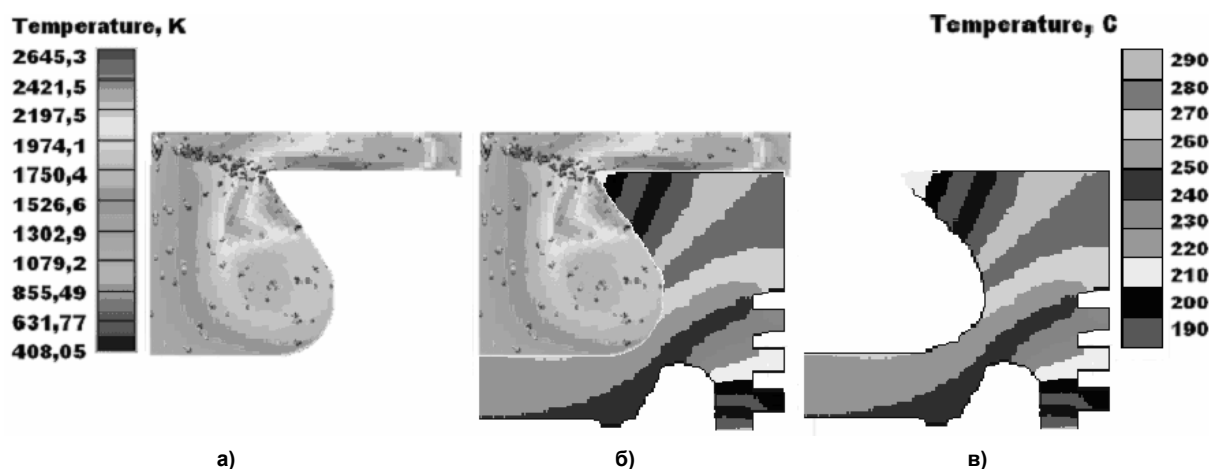


Рис. 5. Распределение температуры в рабочем теле (а), совмещение температурных полей в рабочем теле и в сечении поршня (б) и распределение температуры в сечении поршня и по поверхности камеры сгорания (в) дизеля 4СН15/20,5 ( $P_e = 0,85$  МПа,  $n = 1250$  мин<sup>-1</sup>)

**Выводы.** В результате проведенного исследования подтверждено, что:

- в исследуемой камере сгорания при положении поршня вблизи ВМТ преобладает радиальная составляющая вихревого движения воздушного заряда;
- радиальная составляющая воздушного вихря оказывает незначительное влияние на развитие топливной струи при впрыскивании.

Также было установлено, что:

- формирование и особенно развитие области с повышенной температурой рабочего тела находится в тесной зависимости от направления воздушного вихря;
- область повышенной температуры рабочего тела концентрируется в районе горловины камеры сгорания, что интенсифицирует процесс теплообмена в этой зоне поршня;
- распределение температур в сечении кромки горловины камеры сгорания в поршне определяется характером распределения температуры рабочего тела, омывающего ее поверхности.

Представленная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках программы развития Южно-Уральского государственного университета на 2010–2019 годы по направлению «Современные технологии компьютерного моделирования рабочих процессов и проектирования основных механизмов и систем в дизелестроении» (госконтракт № 11-0520-НИУ от 22.06.2011 г.), методической и научной поддержке фирмы AVL (Австрия, г. Грац) (Agreement for Use of Simulation Softwary AVL BOOST, AVL CRUISE, AVL EXCITE and AVL FIRE between SUSU (Chelyabinsk, Russia) and AVL LIST GmbH (Graz, Austria)).

### Литература

1. Лазарев, Е.А. Температуры поршня и распылителя при изменении пассивного объема пространства сжатия и доли объемного смесеобразования в камере сгорания дизеля / Е.А. Лазарев, М.С. Гитис, В.Е. Лазарев // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: науч. вестн. – 2001. – Вып. 12. – С. 45–55.
2. Иванченко, Н.Н. Рабочий процесс дизелей с камерой в поршне / Н.Н. Иванченко, Б.Н. Семенов, В.С. Соколов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 232 с.

Поступила в редакцию 23 января 2012 г.

Лазарев Евгений Анатольевич. Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интере-

сов – расчет и моделирование рабочего цикла, впрыскивание топлива и тепломеханическая нагрузка дизелей. E-mail: lea2@mail.ru

**Evgeny A. Lazarev.** Doctor of engineering science, professor of the Internal combustion engines department, South Ural state university. The area of scientific interests – research and modeling of piston internal combustion engines processes, injection and burning of fuel, thermal and mechanical loadings of diesel engines. E-mail: lea2@mail.ru

**Лазарев Владислав Евгеньевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – снижение тепломеханической нагруженности и повышение ресурса прецизионных сопряжений элементов топливной аппаратуры дизелей. Тел.: (351) 902-49-77; e-mail: power\_engine@mail.ru

**Vladislav E. Lazarev.** Doctor of engineering science, professor of the Internal combustion engines department, South Ural state university. The area of scientific interests – decreasing of heatmechanic load and increase of resource of precision integration of components of diesel engine fuel equipment of. Tel.: (351) 902-49-77; e-mail: power\_engine@mail.ru