

АНАЛИЗ ВИДОВ НАГРУЖЕНИЯ И ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ РЕСУРСА УПЛОТНЯЮЩЕГО ПРЕЦИЗИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ

*В.Е. Лазарев**, *Г.В. Ломакин**, *Е.А. Лазарев**, *Д.А. Влока***, *Г. Вашмастер***
**Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*
***Мюнхенский технический университет, Мюнхен, Германия*

THE ANALYSIS OF THE TYPES OF LOADS AND FACTORS OF THE SERVICE'S LIFE DECREASING FOR SEALING PRECISION INTERFACE OF THE NOZZLE FROM DIESEL ENGINE INJECTOR

*V.E. Lazarev**, *G.V. Lomakin**, *E.A. Lazarev**, *J.A. Wloka***, *G. Wachtmeister***
**South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*
***Technische Universität München, München, Germany*

Проведен анализ термодинамического, газодинамического и гидромеханического нагружений распылителя топливной форсунки дизеля и выполнена оценка их влияния на уровень теплового и напряженно-деформированного состояния в области уплотняющего прецизионного сопряжения. Представлен анализ причин изнашивания и снижения ресурса элементов уплотняющих прецизионных сопряжений распылителей.

Ключевые слова: распылитель топливной форсунки дизеля, уплотняющее прецизионное сопряжение, ресурс распылителя.

The analysis of the thermo-dynamic, gas-dynamic and hydro-mechanic types of loads is performed for a nozzle of a diesel engine injector. Furthermore the estimation of the influence of mentioned factors to the level of thermal and mechanical condition for sealing precision interface are shown. The analysis of the reasons of wear and a decreasing of the service life for the sealing precision interface of the nozzle is presented.

Keywords: the nozzle of the diesel engine's fuel injector, sealing precision interface, service life of the nozzle.

Введение. Одной из важнейших проблем современного дизелестроения является снижение выбросов вредных веществ отработавшими газами до уровня все ужесточающихся норм, определенных международными стандартами. Мировой опыт свидетельствует, что одним из направлений решения этой проблемы является совершенствование процессов впрыскивания топлива, в частности повышение давления впрыскивания до 200...250 МПа и более при использовании современных средств подачи топлива в цилиндр дизеля (например, аккумуляторных систем питания дизеля топливом – CR). Последнее, в частности, расширяет возможности снижения выбросов оксидов азота как основного токсичного компонента отработавших газов. Однако повышение давления впрыскивания приводит к повышению нагруженности прецизионных сопряжений распылителя форсунки, в частности уплотняющего сопряжения, что в итоге существенно снижает его ресурс.

Метод совершенствования конструкции, функционирования и обеспечения работоспособности распылителя предусматривает использование современных технологий в исследовании механизма изнашивания с учетом топографических особенностей поверхностей трения прецизионных сопряжений. Величина давления топлива в системе топливоподачи дизеля, уровень теплового и гидромеханического нагружения и механические свойства материалов распылителя оказывают

влияние на характер процесса трения и интенсивность изнашивания поверхностного слоя в коническом запирающем прецизионном сопряжении «игла – корпус» распылителя [1, 2].

Снижение герметичности и повышенный износ уплотняющего сопряжения являются следствием ударного характера нагружения, температурных деформаций, интенсивного лако- и нагарообразования, снижающих пропускную способность распыливающих отверстий и гидравлического тракта. Указанные факторы проявляют себя интенсивнее с повышением давления подачи топлива, сопровождающимся при прочих равных условиях увеличением усилия затяжки пружины форсунки, скорости топлива в гидравлическом тракте и общей гидромеханической напряженности топливоподающего узла – форсунки дизеля [3, 4]. В результате увеличение отклонения оси иглы от оси корпуса распылителя, гидродинамическое защемление иглы, переход к режиму граничного трения, а также снижение и даже полная потеря подвижности иглы обуславливают снижение ресурса распылителя в целом и его уплотняющего сопряжения в частности [5].

Оценка и повышение надежности и ресурса распылителя предусматривают детальный анализ конструктивных и функциональных особенностей, теплофизических и механических свойств материалов, условий нагружения, уровня температурного и напряженно-деформированного состояния элементов распылителя.

Термодинамическое и газодинамическое нагружение корпуса распылителя потоком рабочих газов в цилиндре дизеля, гидромеханические нагружения элементов гидравлического тракта и запирающего прецизионного сопряжения давлением топлива и пружиной форсунки, а также механические и кинематические нагружения при сборке и монтаже установочного узла форсунки в головку блока цилиндров дизеля относятся к основным видам нагружения уплотняющего сопряжения.

Термодинамическое, газодинамическое и гидромеханическое нагружение распылителя. Условия **термодинамического нагружения** элементов распылителя в зависимости от его конструкции характеризуются различными условиями теплообмена. Тепловая нагруженность (рис. 1) является причиной коксования топлива в распыливающих отверстиях, появления высоких температурных деформаций и напряжений в области запирающего конуса, износа уплотняющего сопряжения и, как следствие, снижения ресурса распылителя топливной форсунки.

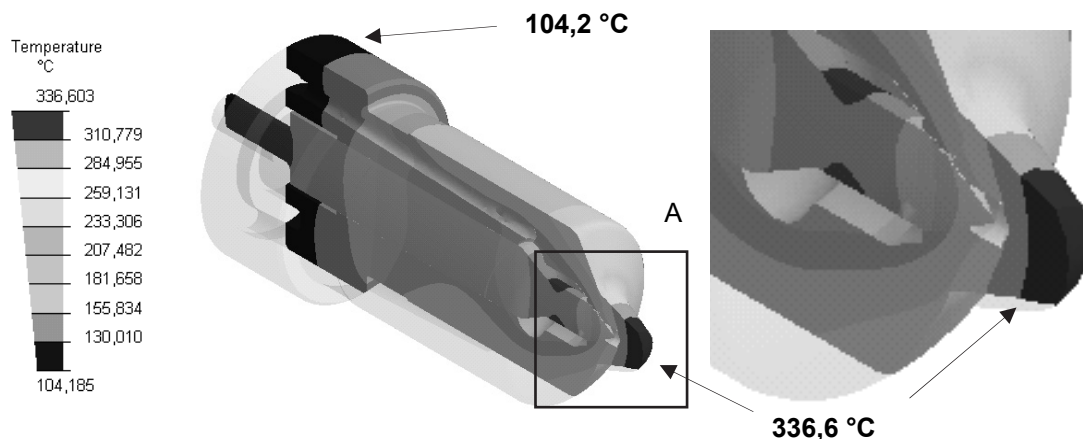


Рис. 1. Распределение температур уплотняющего сопряжения распылителя:
среднее эффективное давление $P_e = 0,9$ МПа, частота вращения коленчатого вала $n = 1250$ мин⁻¹

Нестационарность и цикличность **газодинамического нагружения** корпуса распылителя обусловлены переменными давлением и температурой газов в цилиндре дизеля. В связи с малыми размерами поверхности корпуса распылителя усилия, формируемые давлением газа и нагружающие его, относительно невелики.

В процессе топливоподачи поверхности внутренних полостей распылителя нагружены переменным давлением впрыскиваемого топлива, а в период между последовательными впрыскиваниями – остаточным давлением с колебательным изменением затухающего характера в нагнетательном топливопроводе. Поверхности дренажных полостей распылителя нагружены малым давлением слива топлива, причем переменный характер давления топлива определяет нестационарность и цикличность **гидромеханического нагружения** топливного тракта распылителя.

Расчет и конструирование

Термические деформации конической части иглы и корпуса распылителя вызваны уровнем температур, соизмеримым с температурой наиболее теплонагруженной части цилиндрического сопряжения распылителя, в то время как коническая часть характеризуется более высоким уровнем отвода теплоты в топливо.

Особенности механического нагружения распылителя. Высокий уровень механических нагрузок обусловлен особенностями возвратно-поступательного движения иглы при работе сопряжения, причем движение иглы при открытии распылителя обеспечивается возрастающей при впрыскивании топлива силой давления на дифференциальную площадку, а «посадка» иглы в седло при закрытии распылителя обеспечивается упругой силой со стороны пружины форсунки.

Ударные нагружения торцевой поверхности иглы приводят к нарушению геометрических параметров иглы в области ее контактирования с форсункой, вплоть до появления «заусенцев», а смятие и изнашивание запирающего конуса приводят к частичной или в случае существенного износа полной потере герметичности уплотнения с последующим подтеканием топлива.

Схема распределения сил (рис. 2) в области конического сопряжения «игла – корпус» распылителя позволяет выделить осевую силу T , формирующуюся усилием со стороны пружины и инерционной нагрузкой иглы, штанги и части пружины при движении. При контактировании иглы с седлом корпуса распылителя осевая сила T представлена как совокупность нормальной T_N и тангенциальной T_τ составляющих.

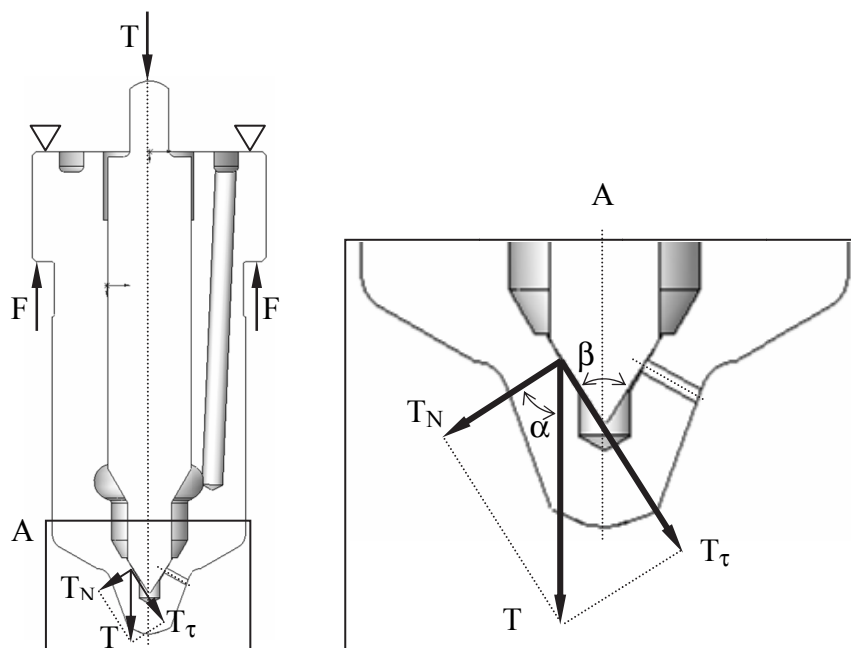


Рис. 2. Схема распределения сил в области уплотняющего сопряжения

Для оценки осевой силы при ударном характере нагружения сопряжения может быть использовано уравнение сохранения энергии, согласно которому кинетическая энергия движения иглы E_k в момент соударения иглы с седлом корпуса распылителя может быть представлена в виде суммы составляющих: энергии микродеформирования E_d и диссипируемой тепловой энергии E_T .

Согласно закону количества движения изменение импульса силы равно произведению массы движущихся частей форсунки m на изменение скорости движения V :

$$m \cdot (V_1 - V_2) = T \cdot t. \quad (1)$$

Время t соударения иглы с седлом корпуса распылителя определено с учетом замедляющегося движения иглы при ударе и контактировании микронеровностей шероховатости. Путь трения s в этом случае определяется классом шероховатости поверхности R_z . При $R_z = 0,25 \dots 0,50$, что соответствует обработке поверхностей конусов игл и корпусов современных распылителей, определится как суммарное значение высот микронеровностей, составляющее примерно 0,5 мкм для иглы и корпуса распылителя соответственно.

Время соударения иглы с седлом корпуса распылителя

$$t = \frac{2 \cdot s}{V} \quad (2)$$

Осевая сила T в уплотняющем сопряжении «игла – корпус» распылителя

$$T = \frac{m \cdot V^2}{2 \cdot s} \quad (3)$$

Таким образом, при значении массы движущихся частей форсунки дизеля, равной например 40 г, средняя скорость скольжения иглы распылителя составляет примерно 0,3 м/с, а время соударения – $4 \cdot 10^{-6}$ с.

При значении угла β при вершине конуса в сопряжении равном 60° нормальная составляющая T_N осевой силы ($T_N = T \cdot \cos\alpha$) составляет примерно 1250 Н.

Следует учесть, что контакт элементов в уплотняющем сопряжении осуществляется через слой топлива, размещающийся в зазоре между иглой и корпусом распылителя, величина которого обуславливается суммарным значением высот микронеровностей для взаимодействующих элементов (иглы и корпуса распылителя).

Уровень деформаций, возникающих в направляющем прецизионном сопряжении (рис. 3) при сочленении распылителя с корпусом форсунки и монтаже форсунки в головку цилиндров дизеля, во многом определяет условия работы уплотняющего прецизионного сопряжения.

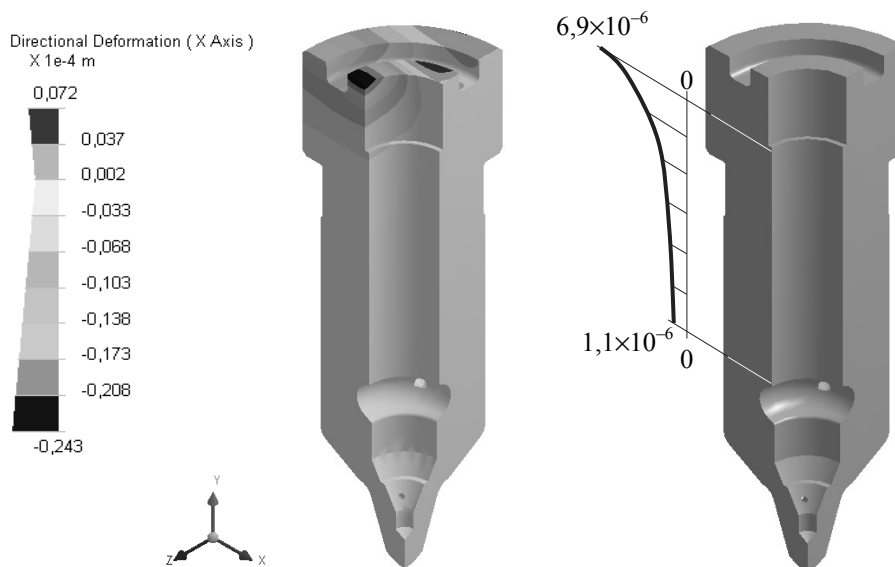


Рис. 3. Распределение монтажных деформаций вдоль оси X для штатного распылителя

Моделированием деформаций в направляющем сопряжении, возникающих при затягивании накидной гайки распылителя в ходе сочленения распылителя с корпусом форсунки при сборке последней, установлены монтажные деформации на уровне $1 \dots 1,5$ мкм на входе в направляющее сопряжение и $6,5 \dots 7$ мкм на выходе из него.

Полученная в результате монтажных деформаций конусность направляющего прецизионного сопряжения распылителя является источником возникновения радиальной силы в данном сопряжении ввиду неравномерности распределения давления топлива в кольцевом цилиндрическом зазоре и причиной снижения уплотняющей способности запирающего сопряжения ввиду смещения оси иглы относительно оси отверстия корпуса распылителя. Данное обстоятельство также ухудшает условия работы уплотняющего сопряжения и приводит к снижению ресурса распылителя топливной форсунки.

Выводы. Таким образом, анализом условий работы распылителей топливных форсунок установлено, что между тепловым, гидродинамическим и механическим нагружением распылителя форсунки существует взаимосвязь. Влияние нагружений различной физической природы на ресурс распылителя требует дополнительного изучения и получения зависимостей скорости и интенсив-

Расчет и конструирование

ности изнашивания в запирающем сопряжении в функции его теплового, гидродинамического и механического видов нагрузений. К основным причинам преждевременного изнашивания и снижения ресурса элементов уплотняющих прецизионных сопряжений распылителей относятся:

- увеличенный и неравномерный радиальный зазор в отверстии для размещения распылителя при монтаже форсунки в головке цилиндров дизеля;
- недостаточно эффективное охлаждение элементов распылителя топливом в его проточной части и установочного узла форсунки охлаждающим агентом системы охлаждения дизеля;
- неравномерная и повышенная температурная деформация элементов распылителя;
- снижение подвижности (прихватывание) и «зависание» иглы распылителя;
- повышенный и неравномерный износ распыливающих отверстий;
- неравномерное распределение топлива при впрыскивании по распыливающим отверстиям;
- потеря герметичности по уплотняющему конусу и гидравлической плотности цилиндрической направляющей иглы;
- перекося иглы при сопряжении ее «хвостовика» с деформированной или установленной с повышенным зазором в корпусе форсунки штангой;
- несоблюдение условий сборки и монтажа форсунки или повышенная деформация головки цилиндров дизеля в месте установки форсунки;
- несовершенная технология изготовления распыливающих отверстий.

Работа выполнена в рамках и при поддержке Федеральной целевой программы Министерства образования и науки Российской Федерации «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00424-а).

Литература

1. Diesel – Speichereinspritzsystem Common Rail. Technische Unterrichtung / Bosch. [Chefred.: Horst Bauer]. – Stuttgart. – Ausgabe 98/99. – 1998. – 49 s.
2. Голубков, Л.Н. Методы расчета топливных систем дизелей / Л.Н. Голубков, Л.Н. Музыка, В.И. Трусов. – М.: Изд-во МАДИ. – 1986. – 79 с.
3. Вейнблат, М.Х. Особенности процесса впрыскивания топлива бесштифтовыми распылителями с различной конструкцией проточной части / М.Х. Вейнблат // Двигелестроение. – 1986. – № 3. – С. 20–25.
4. Файнлейб, Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: справ. / Б.Н. Файнлейб. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1990. – 362 с.
5. Броне, Д.Д. Сгорание в поршневых двигателях / Д.Д. Броне. – М.: Машиностроение, 1969. – 248 с.

Поступила в редакцию 2 сентября 2012 г.

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.: 8(351)902-49-77; e-mail: power_engine@mail.ru

Vladislav E. Lazarev. Doctor of engineering science, Head of the Internal Combustion Engines department of South Ural State University. Professional interests – decreasing of heatmechanic load and increase of resource of precision integration of components of diesel engines fuel equipment. Tel.: 8(351)902-49-77; e-mail: power_engine@mail.ru

Ломакин Георгий Викторович. Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – совершенствование конструкции элементов топливной аппаратуры автотракторных дизелей. E-mail: Lgeorge@yandex.ru

George V. Lomakin. Candidate of engineering sciences, assistant of the Internal Combustion Engines department of South Ural State University. Professional interests – construction updating of auto tractor diesel engine fuel equipment. E-mail: Lgeorge@yandex.ru

Лазарев Евгений Анатольевич. Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – исследование и моделирование процессов в поршневых двигателях внутреннего сгорания. E-mail: Lea2@mail.ru

Evgeny A. Lazarev. Doctor of engineering science, professor of the Internal Combustion Engines department of South Ural State University. Professional interests – research and modeling of processes of piston engines of internal combustion. E-mail: Lea2@mail.ru

Влока Д.А. Инженер-механик в области двигателей внутреннего сгорания и численного моделирования. Исследователь кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Мюнхенский технический университет, Мюнхен, Германия. Область научных интересов – системы и процессы топливоподачи двигателей, термодинамические процессы в ДВС, моделирование и экспериментальная диагностика двигателей внутреннего сгорания. E-mail: wloka@lvk.mw.tum.de

J.A. Wloka. Mechanical engineer for internal combustion engines and numerical simulation, Research Assistant and Doctoral Candidate of the Internal Combustion Engines department of Technische Universität München, München, Germany. Professional interests – fuel injection systems and processes, thermodynamics of Internal Combustion Engines, Simulation and experimental Diagnostics for Internal Combustion Engines. E-mail: wloka@lvk.mw.tum.de

Вашмастер Г. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания», Мюнхенский технический университет, Мюнхен, Германия. Область научных интересов – термодинамические процессы в ДВС, моделирование и экспериментальная диагностика двигателей внутреннего сгорания. E-mail: wachtmeister@lvk.mw.tum.de

G. Wachtmeister. Doctor of engineering science, Professor and Head of the Internal Combustion Engines department of Technische Universität München, München, Germany. Professional interests – thermodynamics and processes of Internal Combustion Engines, Simulation and experimental Diagnostics for Internal Combustion Engines. E-mail: wachtmeister@lvk.mw.tum.de