

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА

В.Е. Лазарев, Г.В. Ломакин, Е.А. Лазарев

*В статье представлено исследование гидродинамических параметров в области прецизионных сопряжений распылителя форсунки дизеля.*

*По сравнению с существующими конструкциями распылителей, разработано и исследовано оригинальное техническое решение исполнения иглы и корпуса распылителя, обеспечивающее формирование дополнительного направляющего сопряжения в нижней части иглы. В обновленном варианте гидравлический тракт предложенного распылителя характеризуется наличием трех базовых прецизионных сопряжений: уплотняющего цилиндрического, уплотняющего конического и дополнительного направляющего.*

*Появление дополнительного направляющего сопряжения позволило разделить функции сопряжений: цилиндрическое сопряжение иглы несет уплотняющую функцию (обеспечивая требуемую гидравлическую плотность и снижая утечки топлива в дренаж), а дополнительное, условно-треугольное сопряжение обеспечивает направляющую функцию (снижая отклонение оси иглы от оси отверстия в корпусе распылителя).*

*С использованием современных систем оценки гидродинамических параметров в потоках жидких сред выявлено и проанализировано распределение давлений и скоростей в потоке топлива, движущегося через исследуемые сопряжения при высоких (до 300 МПа и более) давлениях топливоподачи. Детальный анализ распределения гидродинамических давлений в области дополнительного направляющего прецизионного сопряжения в нижней части иглы распылителя выполнен с использованием методов моделирования гидродинамических параметров.*

*Ключевые слова: распылитель топливной форсунки дизеля, гидродинамические параметры потока топлива, давление впрыска топлива.*

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим направлением развития дизельных систем топливоподачи является неуклонное повышение (до 240...250 МПа в современных системах) давлений впрыскивания топлива [1, 2, 4]. Данное обстоятельство приводит к необходимости совершенствования конструкции и поиска новых технических решений основного элемента системы топливоподачи – распылителя форсунки, в то время как работоспособность распылителей является функцией особенностей нагружения и функционирования элементов прецизионных трибосопряжений и состояния распыливающих отверстий.

Целью исследования является повышение ресурса распылителя и надежности работы форсунки дизеля совершенствованием конструкции распылителя с оценкой ее эффективности по снижению нагруженности прецизионных сопряжений при повышенных (до 300...350 МПа [3, 5, 6]) давлениях впрыскивания топлива. Для этого модифицирована конструкция прецизионного сопряжения с ис-

пользованием технических решений по снижению механической и тепловой нагруженности, минимизации радиальной силы в направляющем элементе и отклонения оси иглы от оси отверстия в корпусе распылителя. Последнее обстоятельство позволяет повысить равномерность распределения топлива по распыливающим отверстиям.

### КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ПО МОДИФИКАЦИИ ПРЕЦИЗИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ

Одним из базовых технических решений, позволяющим повысить ресурс с обеспечением требуемых параметров впрыскивания топлива при повышенных давлениях, является модифицирование схемы контактирования элементов прецизионного сопряжения разделением функции, реализующей уплотнение и центрирование иглы в корпусе (рис. 1).

К числу основных отличительных особенностей модифицированного распылителя относятся:

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА

- уменьшенная с 18 до 9 мм длина основного направляющего элемента сопряжения;
- сниженная в 1,4 раза масса иглы распылителя;
- создание дополнительного направляющего сопряжения в нижней части иглы.

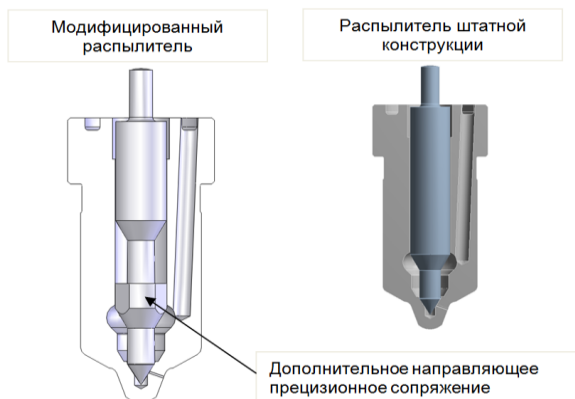


Рисунок 1 – Штатный и модифицированный распылители с разделением функций уплотнения и центрирования иглы в корпусе

Минимизация отклонения оси иглы от оси отверстия в корпусе обеспечивается созданием дополнительного направляющего элемента прецизионного сопряжения в нижней части иглы. Специальная (условно-треугольная) форма поперечного сечения дополнительного направляющего элемента, препятствуя радиальному смещению иглы распылителя, обеспечивает продвижение топлива к дифференциальной площадке иглы для ее подъема. Это позволяет повысить идентичность давлений и скоростей топлива перед распыляющими отверстиями при впрыскивании и, как следствие, равномерность дозирования и распределения топлива в объеме камеры сгорания [8]. Данное обстоятельство, снижая неравномерность состава смеси (локальных коэффициентов избытка воздуха) по камере сгорания, способствует улучшению экономических и экологических показателей дизеля. Модифицированная конструкция иглы распылителя, предусматривающая удаление части металла в центральной области и снижение ее массы, дополнительно способствует снижению ударных инерционных нагрузок в коническом уплотняющем прецизионном сопряжении [7, 9].

Эффективность предлагаемого технического решения подтверждается оценкой гидродинамических параметров топлива в проточной части гидравлического тракта для дополнительного направляющего сопряжения в

условиях повышенных до 300 МПа давлениях впрыскивания.

### ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА ТОПЛИВА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ СХЕМОЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Оценка гидродинамических параметров потока топлива в дополнительном элементе сопряжения распылителя выполнена использованием математического моделирования его течения во фрагментах проточной части. При этом выполнена подготовка соответствующих моделей, проанализированы и приложены начальные и граничные условия. В результате решения задачи моделирования движения топлива определялись распределения гидродинамических давлений и скоростей потока в проходных сечениях гидравлического тракта дополнительного элемента прецизионного сопряжения.

Контурные (геометрические) модели топливного тракта, конечно-элементные и расчетные модели сплошной топливной среды, вычисления с использованием численных методов и анализ полученных результатов в комплексе обеспечили реализацию численного решения основных уравнений гидродинамики движения топливной среды в области исследуемого элемента сопряжения.

Создание расчетных моделей, помимо указания начальных параметров в ячейках расчетной области, предусматривало выбор математических моделей основных законов. Для получения распределения скорости и давления в исследуемых потоках использованы уравнение неразрывности и уравнение моментов количества движения. Указанный подход характерен при решении задач гидродинамики, а расчетная модель предусматривает выбор исходных данных во входных и выходных сечениях исследуемого потока — граничных условий.

В соответствии с используемым алгоритмом для получения корректных результатов расчета выполнен поиск «сходящихся» решений как наборов параметров, при значениях которых выполняются, решаемые численно, уравнения движения в потоке жидкости. Проведение анализа осуществлено применительно к каждой расчетной ячейке, а полученные результаты распространены на всю расчетную область.

Полученные результаты представлены в виде полей распределения гидродинамических давлений и скоростей в потоке топлива

для дополнительного элемента прецизионного сопряжения в нижней части иглы распылителя.

В соответствии с используемым подходом к анализу гидродинамических параметров топливного тракта в исследуемом элементе сопряжения созданы контурные, сеточные и расчетные модели, учитывающие радиальное смещение оси иглы от оси отверстия в корпусе (рис. 2).

Величина смещения оси иглы от оси отверстия в корпусе распылителя варьировалась в пределах от 0,8 до 2,4 мкм с шагом 0,8 мкм, поскольку радиальный зазор в направляющем сопряжении «игла – корпус» распылителя даже для распылителей с относительно большими величинами наработок (более 30 тысяч моточасов) редко превышает 10...12 мкм. В таких условиях для дополнительного направляющего элемента сопряжения величина отклонения оси иглы от оси корпуса распылителя составляющая 2,5...3 мкм может рассматриваться как предельно возможная.

В последние годы наиболее популярны и широко используются в инженерной среде программные пакеты, реализующие численное решение уравнений Навье-Стокса, которые положены в основу анализа всех гидродинамических процессов и, при имеющихся допущениях, имеют удовлетворительное согласование результатов с данными, полученными экспериментально.

Согласно данным, опубликованным в работах [10, 11, 12], в общем случае, для решения задач гидродинамики, требуется решить систему из следующих независимых уравнений:

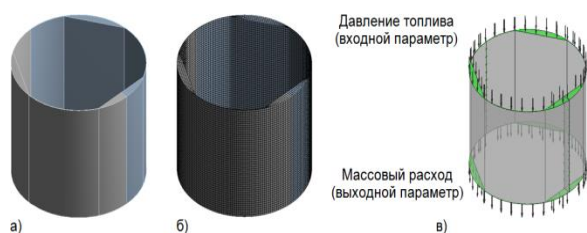


Рисунок 2 – Твердотельная (а), конечно-элементная (б) модели топливного слоя и приложение граничных условий гидродинамического нагружения (в) модели дополнительного элемента прецизионного сопряжения в нижней части иглы распылителя

Учитывая, что в цилиндрическом направляющем прецизионном сопряжении распылителя, течение жидкой среды в зазоре

условно можно рассматривать, как прямолинейное, общая для всех разработанных типов сеточных гидродинамических моделей, математическая модель, представлена уравнениями (1) и (2). Изменение давления при этом рассматривается только вдоль оси, совпадающей с осью корпуса распылителя

$$\frac{dp}{dx} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где  $\frac{dp}{dx}$  – изменение давления вдоль оси

сопряжения, Па/м;

$\mu$  – динамическая вязкость дизельного топлива, Па·с;

$u$  – осевая составляющая скорости движения жидкой среды, м/с;

$r$  – средний радиус цилиндрического канала сопряжения, м.

Для определения переменных величин уравнений Навье-Стокса обычно дополнительно используют уравнение неразрывности

$$\frac{dp}{dt} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность дизельного топлива, кг/м<sup>3</sup>.

Применительно к описанию течений идеальной несжимаемой жидкости и при условии «прилипания» частиц жидкости на стенках каналов (рассматривается, как одно из граничных условий модели), система уравнений может быть существенно упрощена.

Для каждого из указанных положений при подъеме и смещении иглы распылителя выполнен анализ гидродинамических параметров и получено распределение давлений и скоростей в потоке впрыскиваемого топлива. Перед проведением расчетных исследований применительно к исследуемым моделям выполнена оценка граничных условий гидродинамического нагружения. В качестве граничных условий гидродинамического нагружения для моделей дополнительного элемента направляющего прецизионного сопряжения использованы значения давлений в полости под дифференциальной площадкой иглы распылителя («входное» сечение) и значения расходов при движении топлива в направлении цилиндрического уплотняющего сопряжения («выходное» сечение модели), обеспечивающих требуемое значение максимальных давлений впрыскивания (рис. 3).

Результаты проведенных расчетов представлены в виде графической интерпре-

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА

тации распределения полей гидродинамических давлений и скоростей потока топлива в области дополнительного элемента направляющего прецизионного сопряжения (рис. 4).

Особенностью используемой модели является объединение участков с различной толщиной топливного слоя. Области, обеспечивающие прохождение топлива к полости под дифференциальной площадкой иглы, характеризуются толщиной (или эквивалентным диаметром) в несколько сотен микрометров, в то время, как области прецизионного сопряжения иглы и корпуса распылителя имеют зазор в несколько микрометров. Данное обстоятельство обуславливает принципиально различный характер движения топлива в указанных полостях.

В соответствии с полученными результатами, локальные увеличения скорости потока топлива наблюдаются в каналах с максимальными значениями проходных сечений. Одновременно с этим, разделенные участки прецизионных сопряжений формируют области дросселирования потока топлива, что неизбежно приводит к снижению скорости в них и, следовательно, локальному увеличению давления.

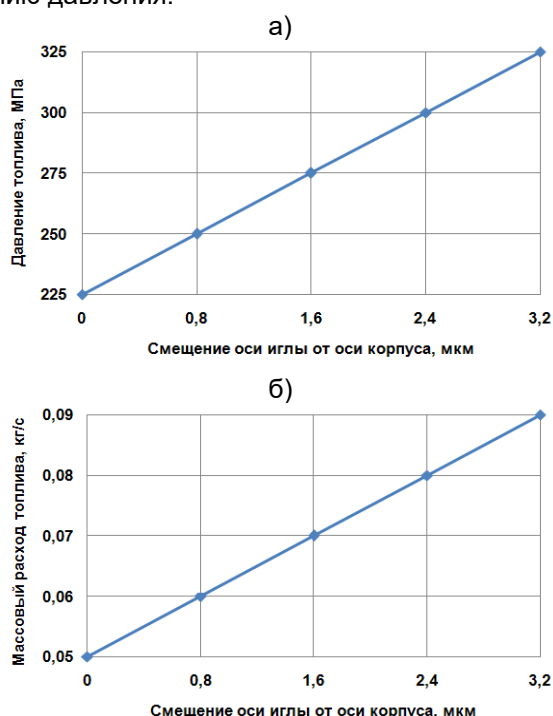


Рисунок 3 – Граничные условия гидродинамического нагружения в области дополнительного элемента прецизионного сопряжения распылителя: давление топлива во входном сечении модели (а) и массовый расход топлива в выходном сечении модели в функции смещения иглы распылителя (б)

Результаты проведенных расчетов представлены в виде графической интерпретации распределения полей гидродинамических давлений и скоростей потока топлива в области дополнительного элемента направляющего прецизионного сопряжения (рис. 4).

Особенностью используемой модели является объединение участков с различной толщиной топливного слоя. Области, обеспечивающие прохождение топлива к полости под дифференциальной площадкой иглы, характеризуются толщиной (или эквивалентным диаметром) в несколько сотен микрометров, в то время, как области прецизионного сопряжения иглы и корпуса распылителя имеют зазор в несколько микрометров. Данное обстоятельство обуславливает принципиально различный характер движения топлива в указанных полостях.

В соответствии с полученными результатами, локальные увеличения скорости потока топлива наблюдаются в каналах с максимальными значениями проходных сечений. Одновременно с этим, разделенные участки прецизионных сопряжений формируют области дросселирования потока топлива, что неизбежно приводит к снижению скорости в них и, следовательно, локальному увеличению давления.

Максимальные значения скорости и давления в потоке зафиксированы для модели с давлением топлива 300 МПа (величина скорости потока составила 44 м/с), а минимальные значения скорости и давления в потоке зафиксированы для модели с давлением топлива 250 МПа (величина скорости потока составила 42 м/с). В соответствии с увеличением давления топлива изменялась и величина отклонения оси иглы от оси корпуса распылителя в интервале от 0,8 до 2,4 мкм.

Характер изменения распределения гидродинамических давлений позволяет сделать вывод о стремлении рассматриваемой системы к «равновесному» положению, поскольку локальное увеличение давления в «защемленных» областях способствует появлению сил, позволяющих восстановить совпадение осей иглы и корпуса распылителя. Однако, поскольку гидродинамическая ситуация изменяется совместно с увеличением давления топлива (от 250 до 300 МПа) целесообразно выполнение специального анализа распределения давлений по поверхности дополнительного элемента направляющего прецизионного сопряжения иглы распылителя.

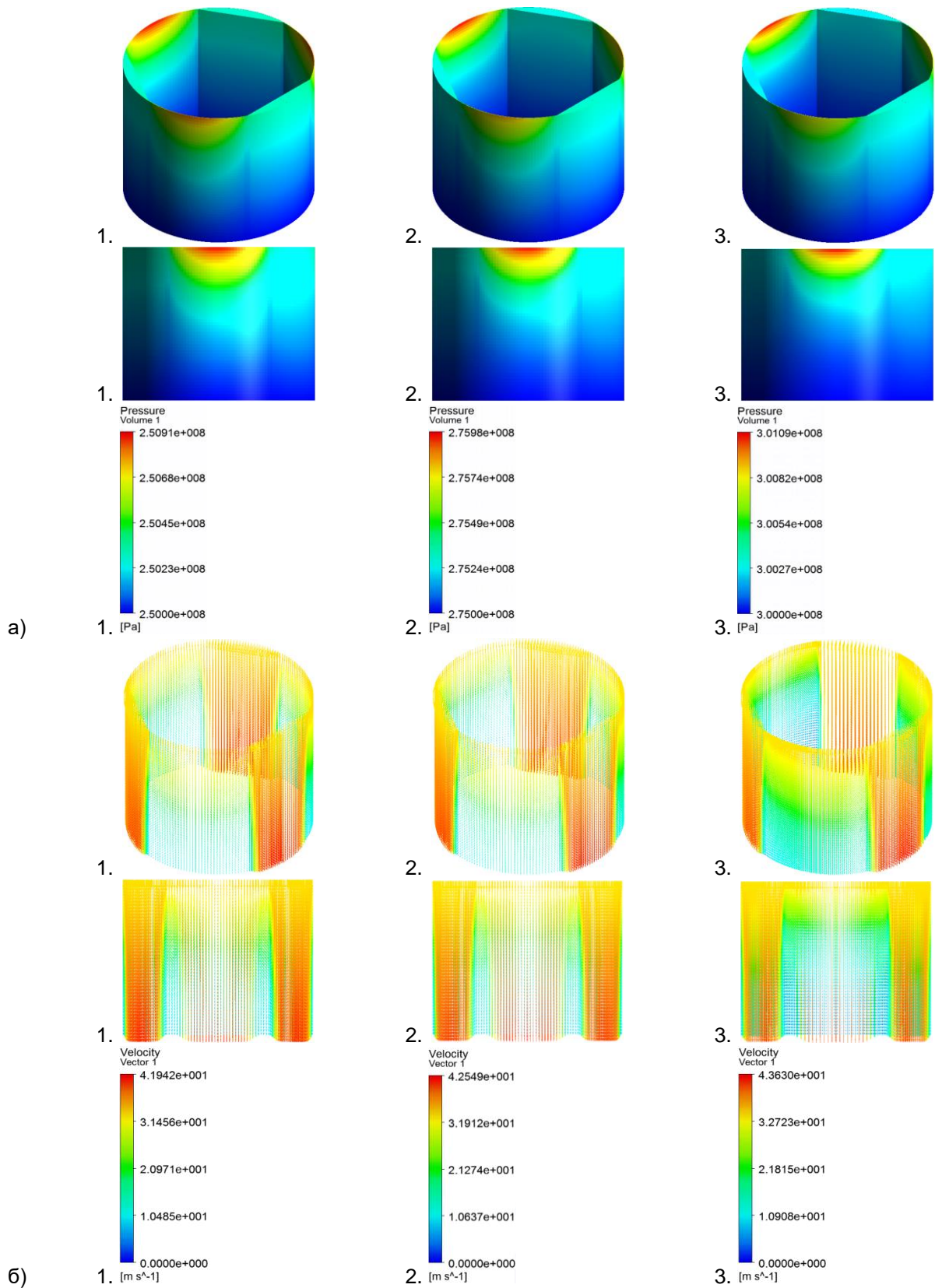


Рисунок 4 – Распределение полей гидродинамических давлений (а) и скоростей (б) потока топлива в области дополнительного элемента направляющего прецизионного сопряжения при различных давлениях впрыскивания (1 – 250 МПа, 2 – 275 МПа, 3 – 300 МПа)

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА

## ВЫВОДЫ

На основании результатов, полученных в ходе гидродинамического моделирования потока топлива в дополнительном элементе прецизионного сопряжения распылителя, можно сделать следующие выводы:

1. Предложенное условно-треугольное поперечное сечение дополнительного элемента направляющего прецизионного сопряжения перераспределяет гидродинамические давления в «защемленных» объемах топлива и способствует появлению усилий, восстанавливающих исходное (центрально-симметричное) положение иглы с совпадением ее оси с осью отверстия в корпусе распылителя. Интеграция дополнительного элемента направляющего сопряжения в конструкцию распылителя способствует повышению устойчивости иглы в корпусе и снижению радиальных нагрузок при впрыскивании топлива.

2. С увеличением давления впрыскивания наблюдается сдвиг области максимального давления в дополнительном элементе направляющего сопряжения в верхнюю его часть, что способствует снижению усилия, формирующего радиальное отклонение оси иглы от оси корпуса распылителя.

## НАУЧНАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках программы «Михаил Ломоносов» (номер для публикаций: 9.9996.2017/5.2), и Германской службы академических обменов DAAD (Linie B, 2017 (57320204), project 91580049) и выполнен совместно с институтом Двигателей внутреннего сгорания Мюнхенского технического университета (Мюнхен, Германия).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев, В.Е. Метод оценки интенсивности изнашивания и ресурса прецизионного сопряжения распылителя топлива в дизеле / В.Е. Лазарев, А.А. Малоземов, В.Н. Бондарь // Двигателестроение. – 2007. – № 3. – С. 26–29.
2. Трусов, В.И. Форсунки автотракторных дизелей / В.И. Трусов, В.П. Дмитренко, Г.Д. Масляный. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.
3. Трусов, В.И. Повышение надежности форсунок автотракторных дизелей / В.И. Трусов, В.П. Дмитренко, Г.Д. Масляный. – М.: НИИАВТОПРОМ, 1968. – 45 с.
4. Robert Bosch GmbH Dieselmotor-Management, volume 3., – 2002. ISBN 3-528-13873-4.

5. Johann A. Wloka & Georg Wachtmeister Macroscopic and Microscopic Spray Pattern for High Pressure Common – Rail Diesel Injection / Journal of Society of Automotive Engineering of Japan, 67(9), 2013.

6. Peters A.: Das Common Rail-Einspritzsystem – Ein Potenzial für den Direktspritz-Dieselmotor, 3. Stuttgarter Motorensymposium, 23-25. Februar 1999.

7. Anders, U. & Scheying, H.: Betrachtungen über die Kraftstoff-Einspritzung schnellaufender Vorkammer-Dieselmotoren, MTZ Jahrg, 22 Heft 7 Juli 1961.

8. Stegemann, J. Injection System for Fully Variable Control of the Shape / J. Stegemann, S. Meyer, T. Rolle, G. Merker // MTZ worldwide. – 2004. – Vol. 65. – №2. – P. 13-16.

9. Grosse-Löscher, H.; Haberland, H.: Schwarmintelligenz zur Optimierung von Einspritzdüsen. In: MTZ 71 (2010), Nr. 2, S. 80–85.

10. Lazarev V.E. Different technical designs for the guiding "needle –nozzle" interface of a diesel engine's injector and it's influence to injector's loading and service life / E.A. Lazarev, J. Wloka, G. Wachtmeister, R. Jisa, G. Vorlauffer // International scientific and technical conference – OeTG Symposium "Tribology in Industry and Research", 24th of November, 2011, Wr. Neustadt, Austria. – 2011. – p. 175–184

11. Рысс, К.Н. Расчетное прогнозирование расходных характеристик распылителей дизельной топливной аппаратуры / К.Н. Рысс, А.А. Денисов, Л.В. Грехов, Ю.А. Гришин // Известия ВолгГТУ. – 2008. – № 3. – С. 57–60.

12. Lazarev V.E. A Method for the Estimation of the Service Life of a Precision Guiding Interface "Needle – Nozzle Body" of a Common-Rail-Injector for High Rail Pressures / J. Wloka, G. Wachtmeister // JSAE/SAE International Conference – Powertrains, Fuels and Lubricants, 30 of Aug.-2 of Sept., 2011, Kyoto, Japan. Copyright © 2011 Society of Automotive Engineers of Japan, Inc.

**Лазарев Владислав Евгеньевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания и электронные системы автомобилей» Южно-Уральского государственного университета, e-mail: [lazarevve@susu.ru](mailto:lazarevve@susu.ru), тел.: 8 -351-902-49-77;

**Ломакин Георгий Викторович** – к.т.н., доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания и электронные системы автомобилей» Южно-Уральского государственного университета, e-mail: [lgeorge@yandex.ru](mailto:lgeorge@yandex.ru), тел.: 8(951) 47-75-120;

**Лазарев Евгений Анатольевич** – Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания и электронные системы автомобилей» Южно-Уральского государственного университета, e-mail: [lazarevea@susu.ru](mailto:lazarevea@susu.ru), тел.: 8 - 904-811-52-21.