

УДК 621.436.038

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАГРУЖЕНИЯ НАПРАВЛЯЮЩЕГО ПРЕЦИЗИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

Применительно к различным моделям поточной динамики (CFD) выполнен анализ движения потока топлива в гидравлическом тракте цилиндрического направляющего прецизионного сопряжения распылителя топливной форсунки дизеля. Моделированием получено распределение давлений и скоростей потока топлива в сопряжении, определены значения радиальной силы и рассмотрены вопросы повышения ресурса направляющего прецизионного сопряжения при высоких (до 120 МПа) давлениях впрыска топлива.

Ключевые слова: распылитель топливной форсунки дизеля, направляющее прецизионное сопряжение, давление впрыска топлива, гидродинамические параметры сопряжения.

Введение

Одним из основных требований, предъявляемых к современным энергетическим установкам и, в частности, к транспортным дизелям, является повышение их энергетической эффективности. Указанное требование предусматривает неуклонное повышение технического уровня серийно выпускаемых двигателей, которое, помимо увеличения удельной мощности, включает в себя улучшение экономических и экологических показателей, а также повышение надежности и ресурса двигателей.

К числу наиболее перспективных способов реализации, предъявляемых к современным дизелям требований относят повышение давления подачи топлива, причем абсолютные значения используемых давлений настолько высоки (до 250...300 МПа), что данное обстоятельство заставляет пересматривать используемые технические решения с точки зрения их способности выдерживать постоянно возрастающие нагрузки. Столь существенное повышение давления в системе топливоподачи дизеля приводит к резкому увеличению уровня нагруженности прецизионных сопряжений элементов топливной аппаратуры и, в частности, цилиндрического направляющего прецизионного сопряжения распылителя форсунки (рис. 1).

Перемещение иглы в корпусе распылителя в процессе работы дизеля осуществляется в осевом направлении, и спровоцировано изменением давления топлива в системе топливоподачи и усилием со стороны возвратной пружины. Радиальное перемещение иглы в корпусе распылителя, в результате кото-

рого игла контактирует со стенкой корпуса, вызвано распределением давления топлива в тонком (до 2 мкм) цилиндрическом зазоре сопряжения, величина которого регламентируется взаимным расположением иглы и корпуса [1].

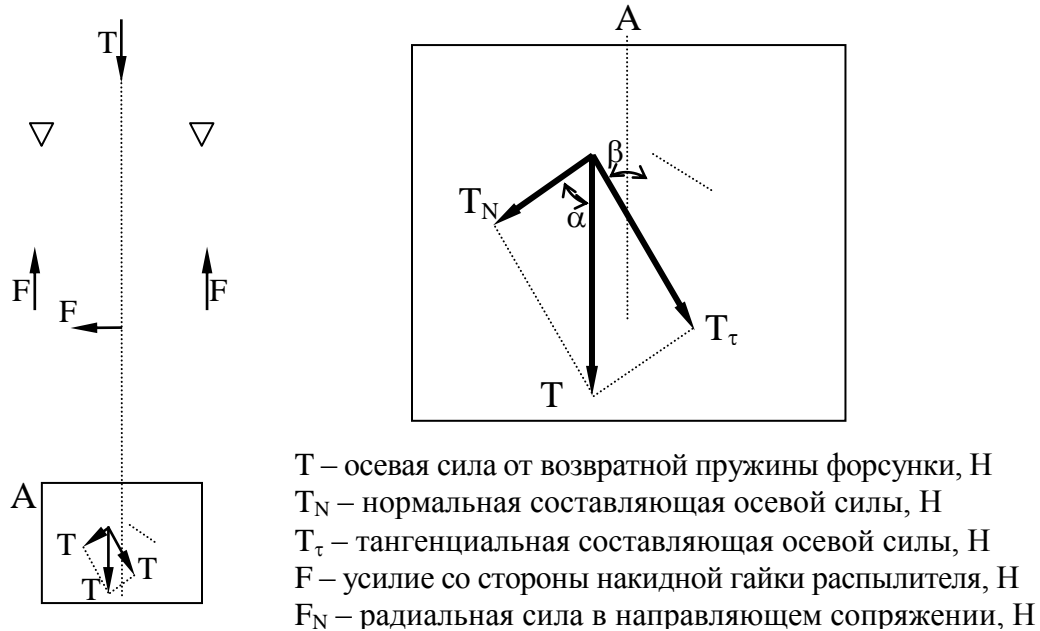


Рис. 1. Схема распределения сил в области направляющего и уплотняющего прецизионных сопряжений распылителя

Анализ существующих методов оценки нагруженности сопряжения

Согласно ранее проведенным исследованиям [2, 3, 4], аналитическая оценка действующих нагрузок, в частности величины радиальной силы, возникающей в направляющем сопряжении и способствующей изнашиванию иглы и корпуса распылителя, возможна с использованием зависимости, предложенной Т.М. Баштой [2]. Однако, наличие достаточно большого количества трудноопределимых параметров сопряжения, делает ее чрезвычайно затруднительной, а опытная проверка полученных результатов не представляется возможной. Кроме того, данная зависимость позволяет оценить величину условной средневзвешенной радиальной нагрузки в сопряжении, но, к сожалению, не предоставляет информации о характере распределения давлений топлива и, следовательно, возникающих нагрузок по его протяженности.

В связи с указанными недостатками аналитического подхода к оценке радиальной силы в цилиндрическом направляющем прецизионном сопряжении использование численных методов моделирования гидродинамических параметров при помощи современного CFD (Computational Fluid Dynamic) программного обеспечения представляет практический интерес и позволяет выполнить сравнительную оценку результатов, полученных использованием аналитического решения и методов математического моделирования.

Математические CFD-модели потока в сопряжении

Игла и корпус распылителя, как элементы, формирующие цилиндрическое прецизионное сопряжение, имеют самостоятельные оси симметрии, совпадение которых является частным случаем их взаимного расположения, и на практике, не представляется возможным, ввиду особенностей теплового, гидродинамического и механического (в т.ч. и монтажного) нагружений распылителя. В связи с этим, для моделирования гидравлического тракта исследуемого сопряжения созданы математические модели со следующими вариантами взаимного расположения иглы и корпуса:

- ось направляющего сопряжения иглы совпадает с осью отверстия в области направляющего сопряжения в корпусе распылителя (идеализированная модель, рис. 2, а);
- ось направляющего сопряжения иглы не совпадает с осью отверстия в области направляющего сопряжения в корпусе распылителя и имеет параллельное смещение, а угол между осью иглы и осью корпуса распылителя равен нулю (условно-идеализированная модель, рис. 2, б);
- ось направляющего сопряжения иглы не совпадает с осью отверстия в области направляющего сопряжения в корпусе распылителя, причем игла имеет наклон или «перекос», и угол между осью иглы и осью корпуса распылителя не равен нулю (условно-реалистичная модель, рис. 2, в).

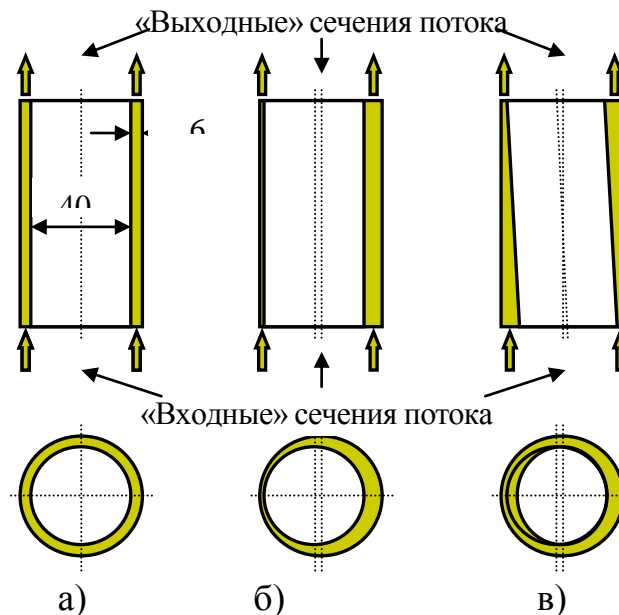


Рис. 2. Схемы идеализированной (а), условно-идеализированной (б) и условно-реалистичной (в) моделей гидравлического тракта направляющего прецизионного сопряжения распылителя

В качестве граничных условий гидродинамического нагружения для моделей направляющего прецизионного сопряжения использованы значения давлений в полости под дифференциальной площадкой иглы распылителя («входное» сечение модели) и значения расходов при движении топлива в направлении дренажной магистрали («выходное» сечение модели), обеспечивающих требуемое значение максимальных давлений топливоподачи.

Гидродинамические параметры и, в частности, связь распределения давления и скорости потока дизельного топлива с геометрическими характеристиками гидравлического тракта направляющего прецизионного сопряжения распылителя, исследовались при условии идеально-гладких поверхностей иглы и корпуса в направляющем сопряжении. Указанное допущение обосновано параметрами шероховатости иглы и корпуса распылителя в области исследуемого сопряжения ($R_a = 0,065$) с максимальной высотой микронеровностей, составляющей, примерно, $0,25$ мкм при предельной толщине слоя топлива на входе в зазор до 10 мкм.

Результаты расчетных исследований

Для всех рассмотренных случаев, расчет выполнен при давлении во «входном» сечении модели (в полости под дифференциальной площадкой иглы) – 40 МПа и расхода топлива в «выходном» сечении направляющего сопряжения распылителя – $3,6 \times 10^{-4}$ кг/с (рис. 3).

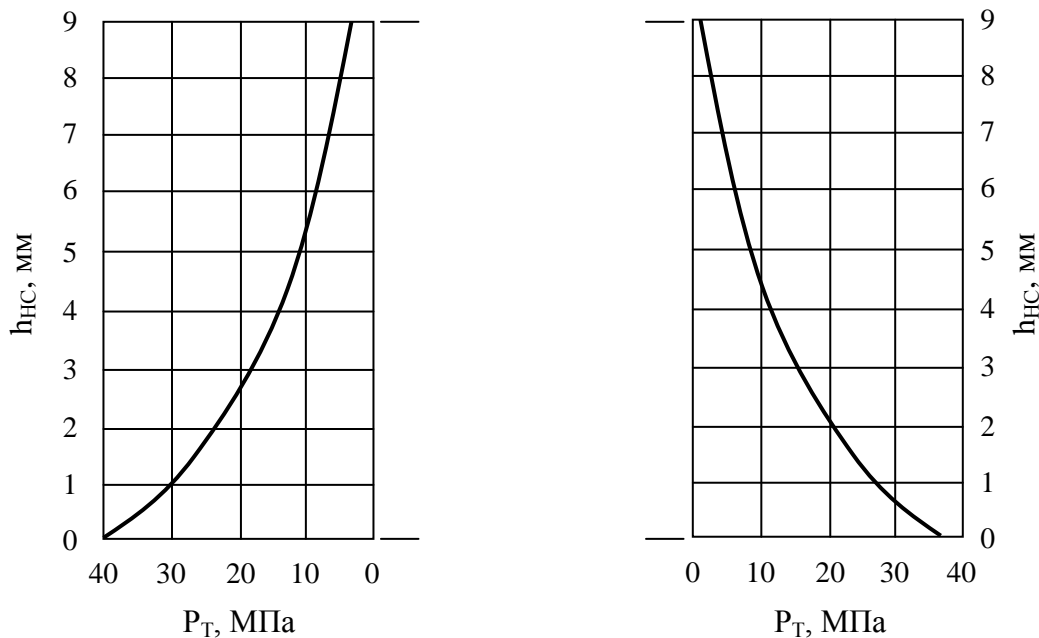


Рис. 3. Изменение давления топлива по протяженности гидравлического тракта направляющего сопряжения ($P_{ВХ} = 40$ МПа, $G = 3,6 \times 10^{-4}$ кг/с)

Полученные результаты, характеризующихся изменением максимального давления топлива на входе в зазор сопряжения, при имеющихся геометрических параметрах последнего, отношение выявленных максимальной и минимальной скоростей потока, близко к двукратному.

Таким образом, для каждой исследуемой модели, получены кривые изменения результирующего давления, действующего на боковую поверхность иглы распылителя, в направляющем сопряжении (рис. 4).

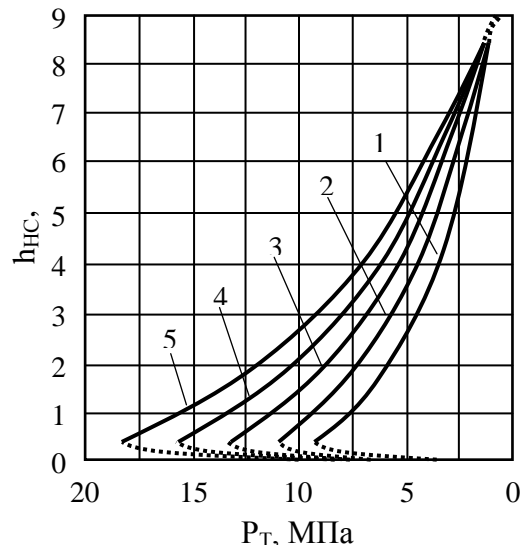


Рис. 4. Результирующее давление на боковую поверхность иглы распылителя по протяженности направляющего прецизионного сопряжения при различных давлениях топлива (1 – $P_{ВХ} = 40$ МПа, 2 – $P_{ВХ} = 60$ МПа, 3 – $P_{ВХ} = 80$ МПа, 4 – $P_{ВХ} = 100$ МПа, 5 – $P_{ВХ} = 120$ МПа)

Для определения действующей в сопряжении радиальной силы, полученные разности давлений проинтегрированы по протяженности гидравлического тракта цилиндрического прецизионного направляющего сопряжения (рис. 5, а). Величина радиальной силы в сопряжении получена, как произведение интегрального давления, действующего на боковую поверхность иглы распылителя в цилиндрическом направляющем сопряжении, и площади диаметрального сечения направляющей части иглы (рис. 5, б).

В качестве базового условия при оценке интегрального давления ($P_{ИНТ}$), действующего на боковую поверхность иглы распылителя, принято условие равенства площади под кривой изменения давления в направляющей части сопряжения и площади прямоугольника, сформированного величиной интегрального давления и протяженностью ($h_{НС}$) прецизионной части иглы распылителя. Начальный участок, протяженностью около 0,5 мм, на входе в сопряжение и конечный участок, примерно такой же протяженности, на выходе из сопряжения не учитывался, поскольку, согласно результатам расчета, в указанных областях наблюдалась нестабильность потока.

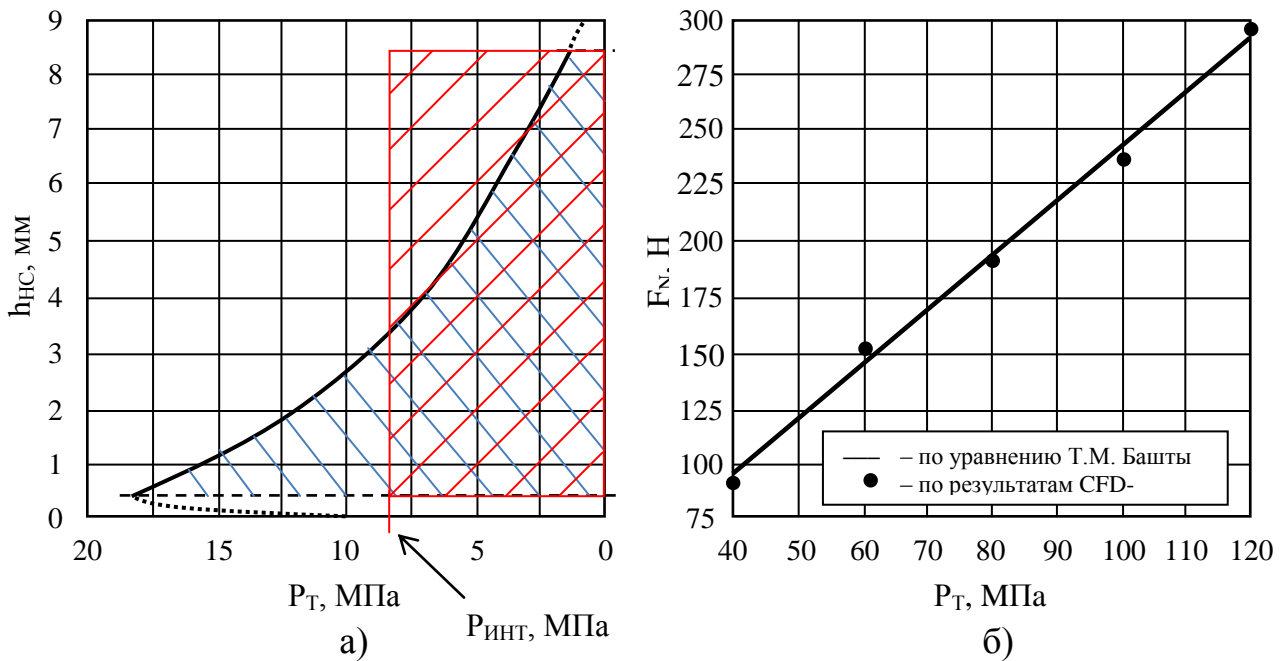


Рис. 5. Оценка интегрального давления топлива, действующего на боковую поверхность иглы в зазоре направляющего прецизионного сопряжения (а) и зависимость величины радиальной силы в функции максимального давления подачи топлива, согласно результатам расчета по уравнению Т.М. Башты и CFD-моделирования (б)

Заклучение и выводы

Результаты, полученные в ходе оценки гидродинамических параметров потока топлива в цилиндрическом направляющем прецизионном сопряжении распылителя, имеют удовлетворительную сходимость (рис. 5, б), и подтверждают удовлетворительную сходимость значений радиальной силы в сопряжении, определенной по уравнению Т.М. Башты и при помощи CFD-моделирования. Данное обстоятельство свидетельствует о правомерности предложенного подхода к оценке радиальной силы в сопряжении и позволяет осуществить проверку полученных результатов, поскольку экспериментальная оценка распределения давлений в исследуемой области затруднительна.

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

- аналитическая зависимость, предложенная Т.М. Баштой, позволяет с удовлетворительной точностью оценить интегральную (по протяженности сопряжения) радиальную нагрузку в цилиндрическом направляющем прецизионном сопряжении распылителя топливной форсунки дизеля. Результаты использования указанной зависимости имеют удовлетворительную сходимость с результатами CFD-моделирования исследуемой области, позволяющими оценить не только среднее значение радиальной нагрузки, но и ее распределение по протяженности сопряжения;

- результаты оценки гидродинамических параметров потока топлива в направляющем сопряжении распылителя, использованием моделей поточной динамики и, в частности, условно-реалистичной модели, позволили выявить неравномерность распределения скорости и давления в потоке не только по протяженности сопряжения, но и в пределах радиальных сечений. Данное обстоятельство обусловлено отклонением оси направляющего сопряжения иглы от оси в области направляющего сопряжения корпуса распылителя, приводящим, первоначально, к изменению геометрических параметров гидравлического тракта и, как следствие, изменению скорости и давления в потоке, и появлению радиальной силы в направляющем сопряжении;

- изменение давления в потоке топлива в пределах радиальных сечений гидравлического тракта неизбежно приводит к появлению радиальной силы в сопряжении, в результате которой игла контактирует с корпусом распылителя, интенсифицируя процессы трения и изнашивания. В соответствии с результатами исследований, чем выше разность давлений на входе в кольцевой зазор сопряжения и на выходе из него, тем выше, возникающая радиальная нагрузка в сопряжении. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод о целесообразности разделения функций направляющего сопряжения – уплотнения и центрирования иглы. Цилиндрическое направляющее сопряжение должно выполнять функцию центрирования иглы в отверстии корпуса распылителя, а функцию уплотнения следует передать дополнительному сопряжению. Данное мероприятие позволит ликвидировать высокую разность давлений на входе в кольцевой зазор сопряжения и выходе из него. Указанный подход, предусматривающий появление оригинальных технических решений в конструкции распылителя и топливоподающей форсунки в целом, вполне может стать тематикой самостоятельного исследования, и актуален для условий постоянно возрастающих давлений подачи топлива в дизелях, и перехода к форсункам с электронным управлением, в системах «Common Rail».

Научная поддержка

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 11.7202.2013) и при поддержке Германской службы академических обменов – DAAD (проект A/12/73347 Ref. 325).

Библиографический список

1. Файнлейб, Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: справочник / Б.Н. Файнлейб. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1990. – 362 с.

2. Лазарев, В.Е. Влияние температуры на радиальную силу в направляющем прецизионном сопряжении распылителя / В.Е. Лазарев // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 230–233.

3. 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. Vorlaufer // International scientific and technical conference – OeTG Symposium “Tribology in Industry and Research”, 24th of November, 2011, Wr. Neustadt, Austria. – 2011. – pp. 175–184.

4. Отчет РНП 2.2.2.3 – 8172 по проекту: «Моделирование параметров трения и изнашивания прецизионных сопряжений “игла – корпус” для повышения ресурса различных типов распылителей транспортных дизелей» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009–2010 годы) / В.Е. Лазарев. – Челябинск, 2009. – 70 с.