

# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАДИАЛЬНУЮ СИЛУ В НАПРАВЛЯЮЩЕМ ПРЕЦИЗИОННОМ СОПРЯЖЕНИИ РАСПЫЛИТЕЛЯ

В.Е. Лазарев

Рассматриваются вопросы оценки радиальной силы в направляющем прецизионном сопряжении «игла-корпус» распылителя топливной форсунки дизеля. Установлена взаимосвязь радиальной силы, уровня температуры в сопряжении и нагрузки дизеля. Приведена оценка основных параметров гидродинамического и механического нагружения распылителя, оказывающих влияние на интенсивность изнашивания прецизионных сопряжений и их ресурс.

Работа направляющего прецизионного сопряжения определяется особенностями гидромеханического нагружения. Игла совершает в корпусе распылителя принудительное возвратно-поступательное движение с возможным поворотом вокруг своей оси на произвольный угол. Монтажные, а также механические и температурные деформации приводят к нарушению соосности иглы и отверстия в корпусе распылителя.

В рассматриваемом прецизионном сопряжении при граничном трении возможно появление известных видов фрикционных связей [1, 2]: упругое деформирование и пластическое отеснение металла в контактных зонах, разрушение поверхностных слоев, «схватывание» поверхностей с микровырывом материала и др. Результатом этих связей являются прогрессирующий износ, снижение подвижности и «зависание» иглы в корпусе распылителя.

При отсутствии деформации и износа элементов цилиндрического трибосопряжения силы давления жидкости уравниваются в радиальном направлении, а поверхности скольжения разделены граничным слоем жидкости [3]. Однако такое состояние элементов сопряжения не является стабильным в течение всего срока службы распылителя.

Переменное по длине и в поперечной плоскости сечение радиального зазора и в этой связи неравномерное распределение давления в топливном слое сопряжения, обусловленное монтажными и температурными деформациями и контактным взаимодействием через штангу с пружиной форсунки, приводит к неустойчивому положению иглы в отверстии корпуса распылителя. При этом возникает неуравновешенная, изменяющаяся по величине и направлению, радиальная сила  $N$  давления топлива на иглу (рис. 1), которая соизмерима с усилием  $T$  затяжки пружины форсунки [2].

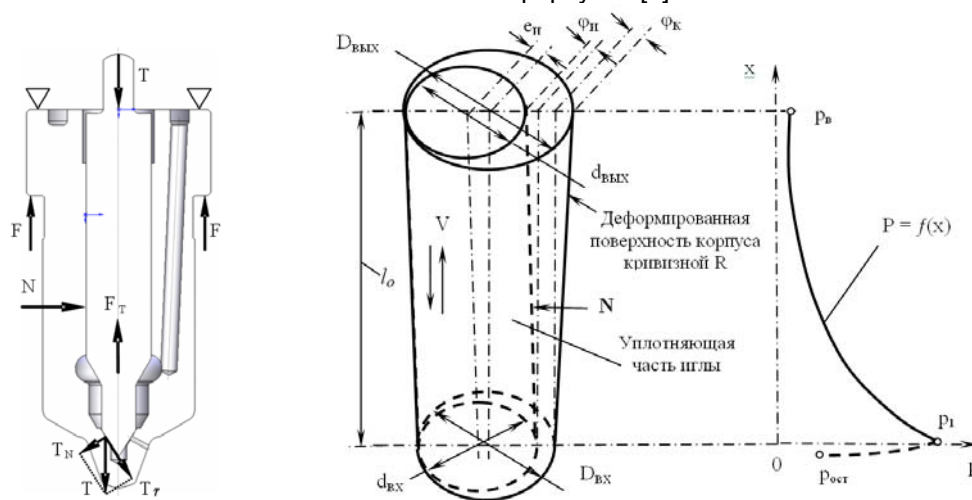


Рис. 1. Силы, действующие на иглу и элементы распылителя

Неустойчивое положение иглы распылителя характеризуется неравномерным эксцентричным отклонением ее оси в пределах радиального зазора при нелинейном увеличении его поперечного сечения по направлению потока топлива. Радиальная сила давления топлива по данным работ [2, 3] определяется:

$$N = \frac{\pi l_0 r k \Delta p}{2e_u} \cdot 1 - \frac{2S_j + k}{\sqrt{(2S_j + k)^2 + 4S_H^2}} \quad (1)$$

Здесь  $k$  – конусность зазора по длине, равная  $0,5[(D_{\text{вых}} - D_{\text{вх}}) + (d_{\text{вх}} - d_{\text{вых}})]$ , м;  $S_H$  – номинальный зазор на входе, равный  $0,5(D_{\text{вх}} - d_{\text{вх}})$ , м;  $D_{\text{вх}}$ ,  $D_{\text{вых}}$ ,  $d_{\text{вх}}$ ,  $d_{\text{вых}}$  – диаметры отверстий в корпусе и иглы на входе и выходе из зазора, соответственно, м;  $r$  – средний радиус зазора  $S_H$ , м;  $l_0$  – длина направляющей сопряжения, м;  $e_u$  – эксцентриситет иглы, м;  $\Delta p$  – перепад давления топлива на длине  $l_0$ , равный  $p_1 - p_e$ , Па;  $p_1$ ,  $p_e$  – давление топлива на входе и выходе из зазора, Па.

Неуравновешенная радиальная сила действует со стороны большего зазора, перемещая иглу к стенке направляющего отверстия и одновременно разворачивая ее ось относительно оси корпуса. Место приложения радиальной силы смещено к входу в радиальный зазор. Характер изменения радиальной силы определяется, наряду с геометрическими параметрами зазора, нестационарностью давления топлива  $p_1$  в полости дифференциальной площадки иглы во времени. Появление радиальной силы, действующей на иглу, вызывает изменение, как характера, так и силы трения. Связь силы трения с динамикой изменения давления топлива заметно наблюдается в период «страгивания» иглы с места и в начальный период повышения давления при впрыскивании топлива. Вследствие возвратно-поступательного движения иглы и нестационарности давления топлива сила трения в цилиндрическом прецизионном трибосопряжении изменяется по направлению и величине [2].

Таким образом, при условии изготовления, сборки и эксплуатации форсунки в соответствии с техническими требованиями, в распылителе обеспечиваются, насколько это возможно, требуемые условия работы прецизионного сопряжения. Можно предположить, что минимальные монтажные и ожидаемые рабочие деформации гарантируют в начале эксплуатации режим жидкостного трения в сопряжении, характеризующийся несущественной радиальной силой давления топлива

на иглу. При этом во время работы лишь незначительно изменяется толщина топливного слоя между поверхностями иглы и корпуса распылителя, сохраняя определенное время режим жидкостного трения с минимальным значением коэффициента трения. С течением времени, различные эксплуатационные факторы, такие как: колебания показателей качества используемого топлива, коксование его в распыливающих отверстиях, кратковременное превышение расчетной нагрузки дизеля, переустановка и ремонт форсунки, повышение температурного состояния и, как следствие, ухудшение напряженно-деформированного состояния элементов сопряжения и т.п., приводят к увеличению неравномерности деформирования и появлению несоосности корпуса и иглы. Последнее сопровождается повышением радиальной силы давления топлива на иглу, локальным уменьшением радиального зазора, и, следовательно, толщины топливного слоя в сопряжении.

Уменьшение радиального зазора, разрывы топливного слоя и нестабильный контакт элементов сопряжения приводят к появлению режима граничного трения, в результате чего еще более интенсивно растут деформации и износ поверхностей. Указанное сопровождается дальнейшим увеличением радиальной силы давления топлива на иглу, в результате чего игла касается и в дальнейшем прижимается к поверхности корпуса распылителя. Повышается коэффициент трения в сопряжении, что приводит к увеличению силы трения. Движение иглы в корпусе в состоянии контакта с поверхностью отверстия обуславливает режим граничного трения с дополнительным, к основной тепловой нагрузке, повышением температуры элементов сопряжения.

Повышение температуры сопровождается уменьшением радиального зазора в сопряжении распылителя, которое приводит к повышению давления  $p_1$  топлива при впрыскивании вследствие снижения утечек и увеличению номинальной площади контакта вследствие теплового расширения элементов сопряжения. Указанное, согласно выражению (1), приводит к повышению радиальной силы  $N$ , значение которой в этой связи корректируется при оценке напряженно-деформированного состояния контактного слоя сопряжения. В процессе упруго-пластического контактирования формируются разрушающие деформации и напряжения, определяющие изнашивание элементов сопряжения.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАДИАЛЬНУЮ СИЛУ В НАПРАВЛЯЮЩЕМ ПРЕЦИЗИОННОМ СОПРЯЖЕНИИ РАСПЫЛИТЕЛЯ

Оценить величину теплового расширения деталей распылителя при рабочих температурах и известных величинах коэффициентов линейного расширения можно с использованием известной зависимости

$$d_t = d_0(1 + \alpha t), \quad (2)$$

где  $d_0$ ,  $d_t$  – линейные размеры элементов распылителя при температуре окружающей среды и рабочей температуре соответственно;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура,  $^\circ\text{C}$ .

Изменение коэффициента линейного расширения материалов контактирующих деталей в функции температуры можно принять удовлетворяющим линейной зависимости.

Учет изменения геометрических параметров иглы, корпуса и зазора в сопряжении «игла – корпус» распылителя вследствие монтажных и тепловых деформации позволяет решать впоследствии контактную задачу с учетом реальных физических процессов контактирования.

Полученные по уравнению (2) значения основных геометрических параметров направляющего сопряжения (диаметры отверстия в корпусе  $D_{вх}$ ,  $D_{tmax}$  и  $D_{вых}$  и иглы  $d_{вх}$ ,  $d_{tmax}$  и  $d_{вых}$  распылителя) (рис. 2) в зависимости от его температуры использованы в уравнении (1) для определения радиальной силы  $N$ .

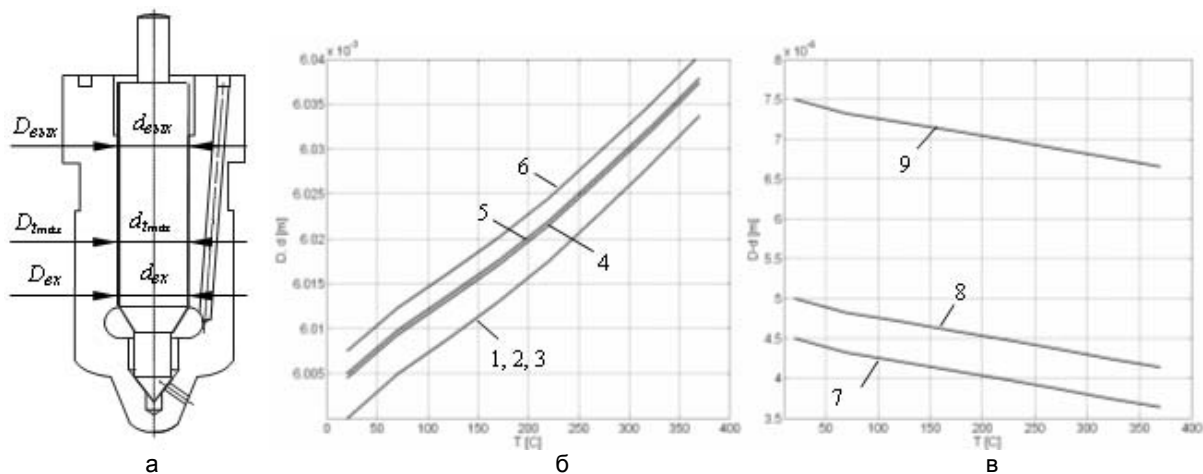


Рис. 2. Характерные геометрические параметры элементов сопряжения распылителя и их изменение в зависимости от температуры: а) сечения по высоте иглы; б) диаметры элементов сопряжения, 1, 2, 3 – диаметры  $d_{вх}$ ,  $d_{tmax}$  и  $d_{вых}$ , 4, 5, 6 – диаметры  $D_{вх}$ ,  $D_{tmax}$  и  $D_{вых}$ ; в) диаметральные зазоры в сопряжении; 7, 8, 9 – зазоры в сечениях  $(D-d)_{вх}$ ,  $(D-d)_{tmax}$  и  $(D-d)_{вых}$

Давление топлива при впрыскивании, а, следовательно, и радиальная сила, действующая на иглу, зависят от нагрузки дизеля, определяемой средним эффективным давлением  $P_e$  (рис. 3а). При неизменной нагрузке дизеля величина радиальной силы определяется влиянием двух факторов: давления топлива в зазоре сопряжения, а также геометрических параметров иглы и корпуса, определяющих площадь поверхности воспринимающей давление топлива.

Геометрические параметры иглы и корпуса распылителя являются функцией температуры этих элементов сопряжения. В этой связи с увеличением температуры растет площадь поверхности иглы, воспринимающей давление топлива.

Величина зазора в сопряжении также является функцией температуры и определя-

ет утечки топлива через зазор при впрыскивании. Поскольку с повышением температуры зазор уменьшается, снижается и величина утечек топлива. Это сопровождается повышением давления при впрыскивании топлива в условиях неизменной цикловой подачи.

Изменение относительного значения радиальной силы в зависимости от относительной температуры элементов сопряжения представлено на рис. 3б. В качестве базовых значений при этом использовались значения радиальной силы  $N_{xx}$  и температуры  $t_{xx}$  сопряжения при работе дизеля на холостом ходу. С увеличением температуры сопряжения вследствие увеличения геометрических размеров иглы растет радиальная сила.

При условии неизменного давления ( $p = const$ ) топлива на входе в зазор сопряжения повышение относительной температуры, на-

пример на 60%, приводит к увеличению радиальной силы на 7% (пунктирная кривая). Дополнительный учет при этом зависимости давления топлива  $p = f(t)$  от температуры (в связи с уменьшением зазора) приводит к повышению радиальной силы на 16% (сплош-

ная кривая). Данные, представленные на рис. 3б, следует использовать для корректировки радиальной силы, определенной по выражению (1), при учете влияния теплового состояния сопряжения, например в случае изменения нагрузки дизеля.

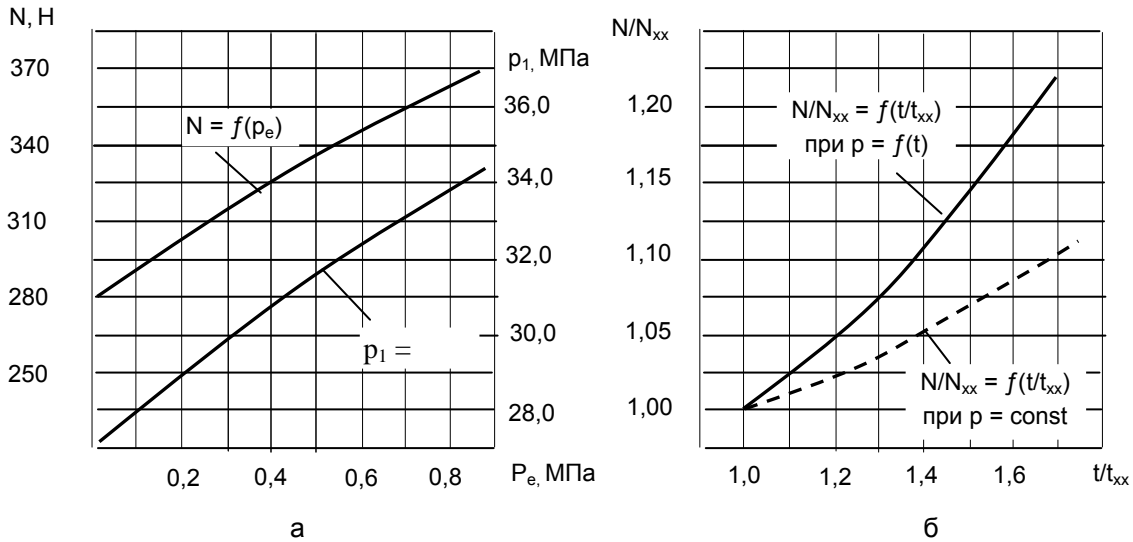


Рис. 3. Зависимости давления топлива в зазоре от среднего эффективного давления дизеля (а) и относительного значения радиальной силы  $N/N_{xx}$  от относительной температуры  $t/t_{xx}$  сопряжения (б) при  $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

2. Трусов В.И., Дмитренко В.П., Масляный Г.Д. Форсунки автотракторных дизелей. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.

3. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971.– 672 с.