

*А.В. Грицюк, канд. техн. наук, Г.А. Щербаков, инж.,  
А.Н. Врублевский, канд. техн. наук, А.В. Денисов, инж.*

## РЕЗУЛЬТАТЫ БЕЗМОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ

### Введение

Основываясь на результатах математического моделирования [1 – 3], а также используя зарубежный опыт, авторами данной статьи разработана отечественная топливная система аккумулирующего типа с электронным управлением. Ключевым элементом данной системы является электрогидравлическая форсунка (ЭГФ). Привод клапана управления у ЭГФ электромагнитный. Проведенное авторами исследование позволяет утверждать, что потенциал электромагнитных устройств, которые обеспечивают высокие перестановочные усилия и быстродействие, не исчерпан. Поэтому разработка и доводка ЭГФ является актуальной задачей. Важным этапом решения данной задачи является проведение безмоторных испытаний топливной системы аккумулирующего типа. На этом этапе можно определить соответствие требованиям, предъявляемым ЭГФ разработанного образца. К таким основным требованиям можно отнести:

1. Возможность организации подачи малых ( $0,5 - 5 \text{ мм}^3$ ) порций топлива (определяется такими показателями, как минимально устойчивая цикловая подача топлива; характер изменения зависимости  $q_{ц}$  цикловой подачи от продолжительности  $t_{ф}$  форсированного электрического импульса).
2. Возможность подачи в цилиндр дизеля топлива при пятифазном впрыскивании.
3. Обеспечение подачи в цилиндр дизеля топлива в рабочем диапазоне частоты вращения коленчатого вала  $800 - 4200 \text{ мин}^{-1}$ .
4. Работа форсунки в широком диапазоне изменения давления в аккумуляторе (от 25 до 150 МПа и выше).

### Анализ публикаций

Экспериментальному исследованию ЭГФ посвящено много работ. В частности, зарубежными авторами в [4 – 7] представлены методики и результаты проведения безмоторных испытаний ЭГФ фирмы BOSCH. Следует подчеркнуть, что принципы работы ЭГФ, а также ее конструктивные особенности требуют разработки методов регистрации основных параметров форсунки. Так, для определения положения иглы и мультипликатора ЭГФ авторами данной работы использован индуктивный датчик [8]. А давление после запорного конуса иглы определяется устройством подробно описанным в [9].

При создании ЭГФ для топливной системы аккумулирующего типа следует обратить внимание на предложения, высказанные в частности, в работе [10], о необходимости организации «адаптивного» процесса управления. Современный уровень развития электроники делает возможным реализовать любой алгоритм адаптации в зависимости от режима работы высокооборотного дизеля, в том числе и для переходных режимов. Очевидно, что определить алгоритмы управления процессом впрыскивания возможно только на основании результатов испытания опытных образцов.

### Цель и постановка задачи

Цель данной работы – определить эффективность применения электрогидравлической форсунки для организации подачи топлива на основных режимах работы дизеля 4ДТНА2. Для достижения данной цели необходимо разработать методику и провести безмоторные испытания опытного образца аккумуля-

лирующей топливной системы с электронным управлением. Именно это является задачей данной работы.

**Объект исследования – электрогидравлическая форсунка**

На рис. 1 приведена конструкция опытной ЭГФ. Принцип работы данной форсунки подробно описан в [1, 2]. Управляющим органом форсунки является электромагнит – совместная разработка ННЦ ХФТИ, КП ХКБД и ХНАДУ. Управляющий сигнал формировался при помощи контроллера разработки фирмы Элон-ТТ (г. Харьков).

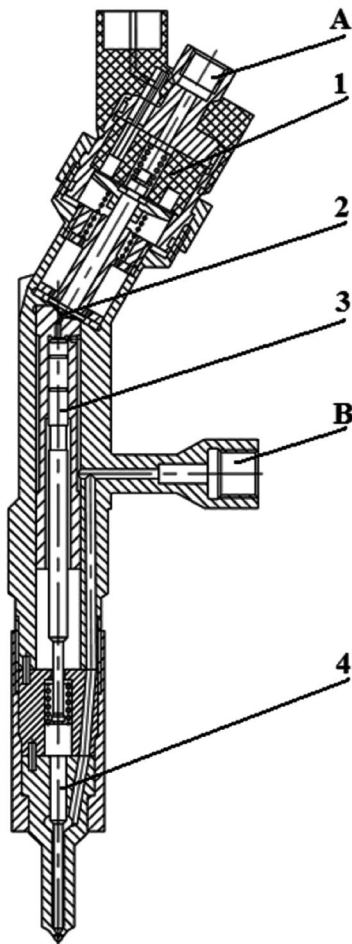


Рис. 1. Конструкция ЭГФ:

1 – электромагнит; 2 – клапан; 3 – мультипликатор; 4 – игла; А – слив топлива; В – подвод топлива

Для гибкого управления законом топливоподачи использовалась программа, позволяющая задавать

от одной до пяти фаз впрыскивания. В каждой фазе можно изменять длительность форсированного импульса, продолжительность фазы удержания, а также период между соседними фазами. Также с помощью программы управления задавалась периодичность впрыскивания топлива.

ЭГФ разработки КП ХКБД укомплектована распылителем с иглой диаметром 3,5 мм, электромагнитом со скоростью перемещения якоря до 0,3 м/с и развиваемой силой более 100 Н. Данная форсунка предназначена для установки на высокооборотный дизель 4ДТНА2 серии 4ДТНА.

**Методика проведения эксперимента**

Опытная форсунка была установлена на безмоторный стенд лаборатории топливной аппаратуры КП ХКБД. Топливо в гидроаккумулятор нагнеталось двумя секциями топливного насоса высокого давления (ТНВД) дизеля 5ТДФ. Необходимый уровень давления в аккумуляторе задавался при помощи изменения подачи топлива ТНВД. Такой способ позволяет снижать затраты мощности на привод насоса и поэтому является наиболее экономичным. В период испытаний регистрировалось изменение следующих параметров:

- давление топлива в аккумуляторе;
- давление топлива после запорного конуса иглы распылителя;
- перемещение мультипликатора;
- изменение тока в катушке электромагнита.

Сигнал об изменении указанных величин поступал на АЦП L-783 фирмы L-card. Обработка сигнала осуществлялась средствами программы PowerGraph 3.3. Цикловая подача топлива, а также расход топлива на управление определялись объемным способом.

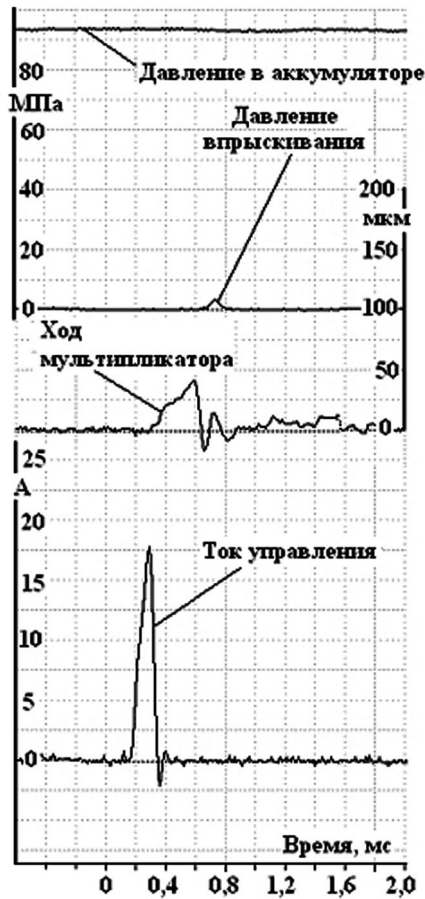
**Результаты испытания ЭГФ**

Определение минимально устойчивой цикло-

вой подачи топлива.

Исследования показали, что в отечественной

ЭГФ минимально устойчивая цикловая подача составила  $0,5 \text{ мм}^3$  (см. рис. 2).



а



б

Рис. 2. Определение минимально устойчивой цикловой подачи топлива:  
а – ЭГФ КП ХКБД, б – BOSCH (длительность управляющего импульса 0,1 мс)

Вследствие особенностей применяемого в форсунке магнитопровода сила тока при этом равна 20 А. Для сравнения, минимально устойчивая цикловая подача ЭГФ BOSCH составляет  $2,4 \text{ мм}^3$  (величина совпадает с данными, приведенными в литературе [11]). При этом максимальная сила тока в катушке равна 14 А.

Следует обратить внимание на характер изменения цикловой подачи с увеличением длительности управляющего импульса  $\tau_{\phi}$  (см. рис. 3). У ЭГФ BOSCH данная зависимость имеет непродолжительный пологий участок в области  $2,5 \text{ мм}^3$ , после чего, при изменении  $\tau_{\phi}$  на 0,02 мс (с 0,08 мс до 0,1 мс),

цикловая подача возрастает в 2,5 раза. Далее зависимость монотонно возрастает с  $6 \text{ мм}^3$  до  $9 \text{ мм}^3$  до значения  $\tau_{\phi} = 0,3 \text{ мс}$ , где зафиксирован участок провала.

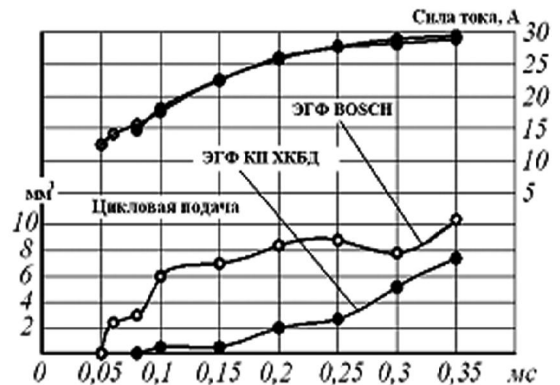


Рис. 3. Характеристика впрыскивания малых порций топлива (давление в аккумуляторе 100 МПа)

Причины образования участков провала и не-монотонный характер приведенной зависимости раскрыты в работах [1, 12, 13].

Характеристика впрыскивания при использовании отечественной ЭГФ в районе минимально устойчивой цикловой подачи –  $0,5 \text{ мм}^3$  имеет более протяженный участок (от  $0,1 \text{ мс}$  до  $0,15 \text{ мс}$ ). Далее с увеличением  $\tau_{\text{ф}}$  цикловая подача монотонно, без провалов, возрастает. Отметим также, что при  $\tau_{\text{ф}} = 0,35 \text{ мс}$  (сила тока  $29 \text{ А}$ ) цикловая ЭГФ BOSCH равна  $10,8 \text{ мм}^3$ , а ЭГФ КП ХКБД –  $7,4 \text{ мм}^3$ .

Проведенный анализ полученных авторами осциллограмм показывает, что при малых подачах топлива подъем иглы распылителя не превышает 25 % полного перемещения. Выявлено, что характеристики магнитопровода определяют динамику иглы.

Так, при использовании магнитопровода отечественной разработки получен более пологий передний фронт нарастания давления впрыскивания. Именно это позволяет снизить величину минимально устойчивой цикловой подачи.

#### **Определение возможностей изменения закона топливоподачи**

Указанные выше особенности работы ЭГФ позволяют объяснить характер протекания процесса впрыскивания при подаче управляющего сигнала, состоящего из короткого предварительного и, через заданное время, длительного основного импульсов. Рассмотрим осциллограммы рис. 4, на которых зарегистрированы параметры впрыскивания при двухфазном управляющем импульсе с интервалом между фазами  $0,2 \text{ мс}$ ,  $0,15 \text{ мс}$  и  $0,1 \text{ мс}$ , фазой удержания  $0,5 \text{ мс}$  и периодичностью впрыскивания, соответствующей частоте вращения коленчатого вала  $4200 \text{ мин}^{-1}$ . Изменяя длительность паузы возможно получить различные законы топливоподачи. При паузе  $0,2 \text{ мс}$  ЭГФ обеспечивает двухфазное впрыскивание топлива, при уменьшении паузы до  $0,15 \text{ мс}$

цикловая подача не разделяется, и формируется ступенчатое впрыскивание.

Дальнейшее уменьшение паузы до  $0,1 \text{ мс}$  изменяет закон топливоподачи на однофазный с пологим передним фронтом.

Сделаем замечание относительно необходимости моделирования цепи управления электромагнитом. Известно, и эксперимент это подтверждает (см. рис. 4), что изменение тока в катушке ЭГФ происходит не мгновенно.

Имеют место так называемые переходные процессы, длительность которых сопоставима с задаваемой длительностью управляющих импульсов. Так, для достижения силы тока в катушке  $22 \text{ А}$  необходимо время  $0,3 \text{ мс}$ , последующий за этим сброс до  $0 \text{ А}$  произойдет за  $0,15 \text{ мс}$ .

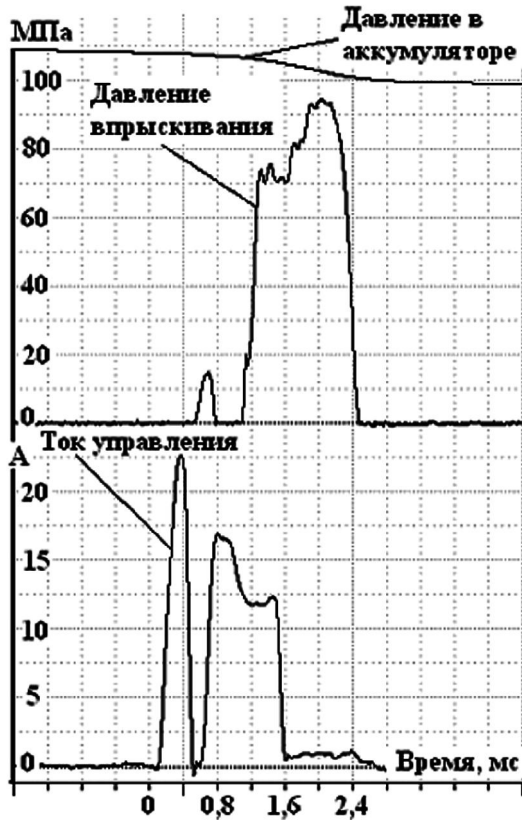
В связи с этим для достоверного моделирования работы ЭГФ необходимо учитывать характеристики блока управления ЭГФ.

В работе [3] приведены зависимости, позволяющие задавать при математическом моделировании ЭГФ характеристики блока управления.

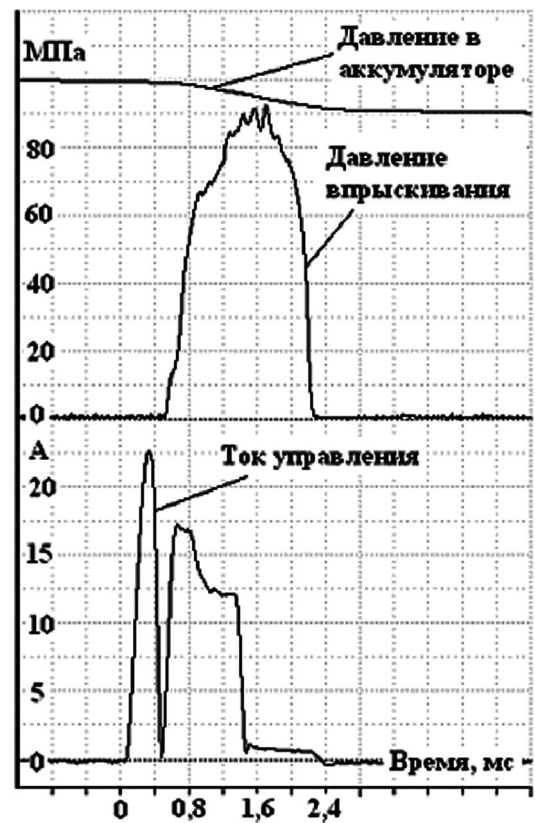
#### **Определение эффективности работы ЭГФ на режимах пуска и холостого хода**

Решающую роль характеристики электромагнита играют при организации впрыскивания топлива ЭГФ на режимах пуска и холостого хода. Давление в аккумуляторе на данных режимах в 4 – 6 раз меньше максимального значения, а, следовательно, и сила, действующая на постоянную площадь клапана управления со стороны камеры управления, во столько же раз уменьшается.

Для преодоления силы предварительной затяжки пружины клапана в таком случае необходим запас по силе, развиваемой электромагнитом. Это условие необходимо, но недостаточное.



а



в



б

Рис. 4. Осциллограммы впрыскивания при двухфазном управляющем сигнале:

период между фазами а – 0,2 мс; б – 0,15 мс; в – 0,1 мс

Как показал эксперимент, при понижении уровня давления в аккумуляторе до 20 МПа обеспечить работоспособность ЭГФ без дополнительных мероприятий не удастся.

Для получения двухфазного впрыскивания на режиме холостого хода было предложено изменить последовательность, величину и длительность задающих электрических импульсов. На рис. 5 показана осциллограмма процесса двухфазного впрыскивания ЭГФ на режиме холостого хода.

Наиболее проблематично организовать предварительное впрыскивание. Для решения данной проблемы предложено управлять предварительным впрыскиванием при помощи двойного форсированного импульса. Первый импульс (начало в точке 1)

продолжительностью 0,4 мс и максимальным током в катушке 28 А приводит к подъему мультипликатора на 35 мкм (участок 2-3), что при давлении в аккумуляторе 27 МПа оказалось недостаточно для впрыскивания. Следующий без паузы второй форсированный импульс позволяет мультипликатору дополнительно подняться до 50 мкм. Этого достаточно, чтобы с момента времени, соответствующего точке 4, началось впрыскивание пилотной порции топлива.

удержанием, обеспечивающий подъем мультипликатора на участке 8-11 и впрыскивание основной порции топлива в период между точками 9-12. Суммарная цикловая подача на исследуемом режиме составила 8 мм<sup>3</sup>.

Вторым методом, позволившим без изменения размеров ЭГФ (диаметров жиклеров, запорного шарика управляющего клапана, угла седла клапана и др.), получить стабильную топливоподачу на пуске двигателя является выбор предварительной затяжки пружины иглы.

Данная величина выбирается минимальной, но достаточной для исключения прорыва газов из цилиндра двигателя через распыливающие отверстия под запорный конус иглы. Это позволило в режиме пуска дизеля обеспечить впрыскивание топлива при давлении в аккумуляторе 16 МПа.

#### Выводы

Предложена методика безмоторного испытания электрогидравлической форсунки разработки КП ХКБД. Для управления форсунки использован контроллер и блок питания отечественной разработки. Методика испытания предусматривает измерение хода мультипликатора, давления в гидроаккумуляторе и впрыскивания, силы тока в катушке электромагнита.

Форсунка обеспечивает подачу топлива от 0,5 до 60 мм<sup>3</sup> при давлении в аккумуляторе от 16 до 150 МПа.

Показано, что зависимость цикловой подачи при увеличении времени управляющего импульса монотонно возрастает.

Применение форсунки КП ХКБД в составе топливной аппаратуры аккумулирующего типа обеспечивает многофазную топливоподачу на всех режимах дизелей серии 4ДТНА.

Определены формы управляющих импульсов, обеспечивающих двухфазное впрыскивание топлива

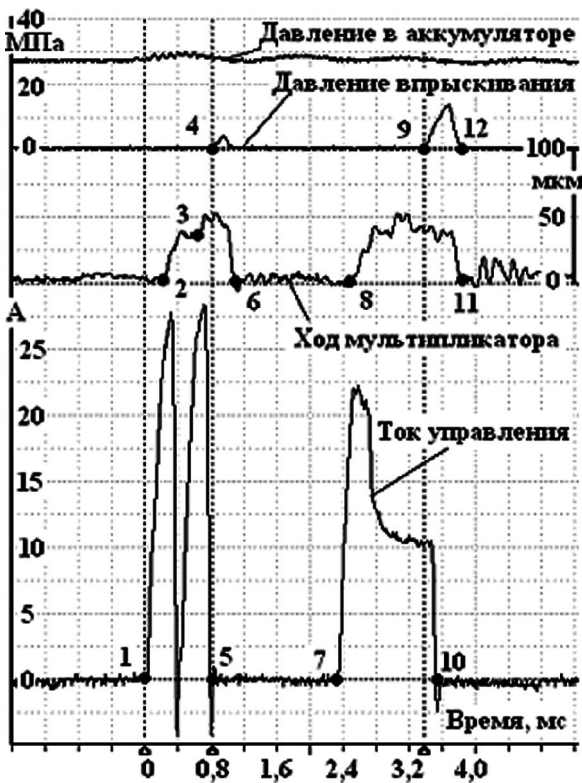


Рис. 5. Двухфазное впрыскивание топлива на режиме холостого хода

Анализ осциллограммы показывает, что конец второго импульса (точка 5) по времени совпадает с началом впрыскивания, а длительность подъема мультипликатора (участок 2-6) равна длительности управляющего сигнала (участку 1-5). Участок 2-6 смещен на 0,25 мс относительно участка 1-5. Через заданный интервал 5-7 на электромагнит подается третий форсированный импульс с последующим

на режиме холостого хода, впрыскивание топлива при пуске двигателя, а также однофазное впрыскивание со ступенчатым или пологим передним фронтом.

**Список литературы:**

1. Врублевский А.Н., Григорьев А.Л., Бовда А.М. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС // *Автомобильный транспорт* № 19. 2006 - с. 138 - 143.  
 2. Врублевский А.Н., Григорьев А.Л., Грицюк А.В., Денисов А.В., Щербаков Г.А. Особенности математического моделирования гидромеханических процессов ЭГФ // *ДВС*, №1, 2007, стр. 44 - 52.  
 3. Врублевский А.Н., Григорьев А.Л., Денисов А.В. Особенности выбора параметров электромагнита для топливной системы COMMON RAIL // *Автомобильный транспорт* № 20. 2007 - с. 75 - 80.  
 4. Coppo M., Dongiovanni C., Negri C. A Linear optical sensor for measuring needle displacement in common-rail diesel injectors *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 134, Issue 2, 15 March 2007, Pages 366-373.  
 5. Seykens X.L.J., Somers L.M.T., Baert R.S.G. Detailed Modeling of Common Rail Fuel Injection Process. *MECCA*, III. 2005. pp. 30 - 39.  
 6. Голубков Л.Н., Емельянов Л.А. Электронная система управления для стендовых испытаний аккумуляторной топливной системы с электроуправляемыми форсунками. *Сборник науч-*

*ных трудов МАДИ (ГТУ) «Перспективы развития энергетических установок для автотранспортного комплекса» 2006. стр. 40 - 46.*  
 7. Емельянов Л.А. Устройство для регистрации параметров впрыска. *Сборник научных трудов МАДИ (ГТУ) «Перспективы развития энергетических установок для автотранспортного комплекса» 2006. стр. 47 - 54.*  
 8. Врублевский А.Н., Вахрушев В.И., Воронков А.В., Денисов А.В. Датчик для регистрации перемещения мультипликатора электрогидравлической форсунки // *Вестник ХНАДУ* Вып. 38. - с. 321 - 326.  
 9. А.Н. Врублевский, А.В. Грицюк, А.В. Денисов, Г.А. Щербаков, С.Б. Сафонов Результаты безмоторных испытаний форсунки для двухфазного впрыскивания топлива // *Двигатели внутреннего сгорания. ХПИ - 2007. - №2. - стр. 43 - 47.*  
 10. Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. - М.: Легион-Автодата, 2001.-136 с.  
 11. Common-Rail injector Пат. EP1574701A1 EU, МПК<sup>7</sup> F02 47/02; Ralf Maier, Stefan Haug, Juergen Keinath; Robert Bosch GmbH; Заявл. 14.01.2005, Оpubл. 14.09.2005.  
 12. Емельянов Л.А. Развитие комплекса математических моделей дизеля, оснащенного аккумуляторной топливной системой с электронным управлением. Автореферат дисс. канд. техн. наук. Москва, МАДИ (ГТУ). 2007. - с. 18.  
 13. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. - М.: Легион - Автодата, 2004. - 344 с.

УДК 621.431.74

**А.Н. Жук, асп., А.И. Епихин, канд. техн. наук**

**ОЦЕНКА СКОРОСТИ ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОВЫХ ТУРБИН АГРЕГАТОВ НАДДУВА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА ТЯЖЕЛОМ ТОПЛИВЕ**

**Введение**

На данный момент в области эксплуатации ТК сложилась ситуация, что надежность их довольно низкая: происходят отказы, приводящие порой к выходу из строя дорогостоящих элементов турбин и, как следствие, к их замене [1]. Изучение процессов переноса, износа и отложения твердых частиц, образующихся при сгорании тяжелого топлива в судовых двигателях, в проточных частях радиально-осевых ступеней (РОС) турбин ТК находится в начальной

стадии. В связи с широким применением тяжелых топлив требуется проведение исследований воздействия продуктов сгорания на проточные части РОС газовых турбин ТК.

**Формулирование проблемы**

Существует множество проблем связанных с плохим или неполным сгоранием, качеством топлива, которые приводят к ухудшению работы двигателя и ТК. Существенной проблемой является загрязнение форсунок, выхлопных клапанов, коллекторов и