

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ С РЕГИСТРОВЫМ НАДДУВОМ

*Ф.З. Байбурин, д.т.н., проф.; А.В. Дергачев, к.т.н., проф.; Д.А. Кляцкий, к.т.н., доц.;
Е.Ю. Бурова, преподаватель
Военно-морской инженерный институт (ВМИИ)*

Разработана математическая модель для расчета эксплуатационных характеристик двигателя с регистровым наддувом, базирующаяся на системе нелинейных уравнений, описывающих физические процессы, происходящие в различных элементах дизеля. Эта модель дает возможность: проводить расчетные исследования двигателя с регистровым наддувом в указанном диапазоне эксплуатационных режимов; исследовать момент отключения-подключения турбокомпрессора; оценивать влияние технического состояния турбокомпрессоров на показатели работы двигателя. Расхождение между результатами расчета и экспериментальными данными не превышает 3 %.

На кафедре двигателей (внутреннего сгорания) Военно-морского инженерного института разработана математическая модель (ММ) для расчета эксплуатационных режимов работы двигателей внутреннего сгорания, базирующаяся на системе нелинейных уравнений, описывающих физические процессы, происходящие в различных элементах дизеля. Для решения такой системы применен метод линеаризации Эйлера–Коши, иначе называемый методом малых отклонений [1, 2]. В основе математической модели лежат алгоритмы, разработанные на кафедре в конце 1960-х–начале 1970-х гг. [3], в дальнейшем дополненные и усовершенствованные, что нашло отражение во многих работах [4–8].

На сегодняшний день эта ММ решает следующие задачи:

- расчет эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на установленных и не установленных режимах работы;
- оптимизация показателей работы ДВС на установленных и не установленных режимах;
- расчет влияния изменения технического состояния узлов и агрегатов ДВС на показатели их работы;
- расчет эксплуатационных характеристик анаэробных двигателей.

ММ эксплуатационных характеристик ДВС позволяет рассчитывать параметры работы цело-

го ряда двигателей с различными схемами наддува (без наддува, с подключенным турбокомпрессором (ПТК), со свободным турбокомпрессором (СТК), как одноступенчатым, так и двухступенчатым, и с комбинированным наддувом).

В настоящее время на отечественных и зарубежных предприятиях (ОАО «Коломенский завод», MTU, МАН и др.) выпускаются двигатели с новым типом системы воздухообеспечения — регистровым наддувом. Представляют интерес разработки фирмы MTU, которая выпускает двигатели типа 2000, 4000 и 8000, применяемые как на коммерческих судах, так и на кораблях военно-морского флота [9]. Так, двигатели типа 8000 и 4000 оборудованы четырьмя турбокомпрессорами, работающими в режиме регистрового наддува, а в двигателях типа 2000 наддув осуществляется двумя турбокомпрессорами. К двигателям с регистровым наддувом, осуществляемым двумя турбокомпрессорами, относится и дизель 16Д49, выпускаемый ОАО «Коломенский завод».

Как упомянуто в статье [9], разработана динамическая модель переходного процесса регистровой системы наддува с учетом помпажа компрессора, включающая в себя модели центробежного компрессора, дросселя (заслонки), камеры сгорания и турбины, а также модель области повышенного давления за компрессором. Там же указано, что эта модель показывает хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Тем не менее, при всех достоинствах представленной в статье [9] модели, она не является моделью дизеля в целом и не отображает его (дизеля) эксплуатационные характеристики. Модель, разработанная на кафедре двигателей (внутреннего сгорания), позволяет, как показано выше в перечне решаемых ею задач, рассчитывать эксплуатационные характеристики дизеля, в том числе и на не установленных режимах работы.

Необходимо отметить, что математической модели для расчета эксплуатационных характеристик двигателя с регистровым наддувом, подобной разработанной на кафедре, в настоящее время не существует.

Четырехтактный V-образный дизель 16Д49 [10, 11] предназначен для использования в качестве

главного двигателя для работы на винт фиксированного шага (ВФШ) через реверс-редукторную передачу. Дизель обеспечивает устойчивую и длительную работу во всем диапазоне нагрузок: от режима холостого хода до полной мощности в соответствии с областью эксплуатационных режимов работы. На дизеле с целью получения повышенной мощности и экономичности применены два параллельно работающих свободных турбокомпрессора.

Отличие регистрового наддува от известной схемы воздухообеспечения с одноступенчатым СТК заключается в том, что установленные на двигателе два СТК, работают практически независимо друг от друга, каждый на свой блок цилиндров (СТК ряда *A* и СТК ряда *B*).

При работе дизеля на режимах, близких к полной мощности, отработавшие в цилиндрах газы собираются в коллекторах рядов *A* и *B* и по патрубкам поступают в соответствующие турбокомпрессоры. С помощью перепускных патрубков давление газов перед турбокомпрессорами рядов *A* и *B* выравнивается, а также снижается уровень пульсации давления в потоке.

На режимах частичных нагрузок (менее 70 % от полной мощности) поток газа, поступающий к турбокомпрессору ряда *B*, перекрывается газовой заслонкой и через патрубки направляется к турбокомпрессору ряда *A*. Работа газовой заслонки синхронизирована с работой воздушной заслонки, установленной на фланце отключаемого (ряд *B*) компрессора. Схема двигателя с регистровым наддувом представлена на рис. 1.

Таким образом, можно выделить два основных режима работы двигателя:

- работа с двумя параллельными СТК — на режимах близких к полной мощности;
- работа с одним СТК — на режимах частичных нагрузок.

Основой для создания ММ расчета параметров работы дизеля послужила разработанная на ка-

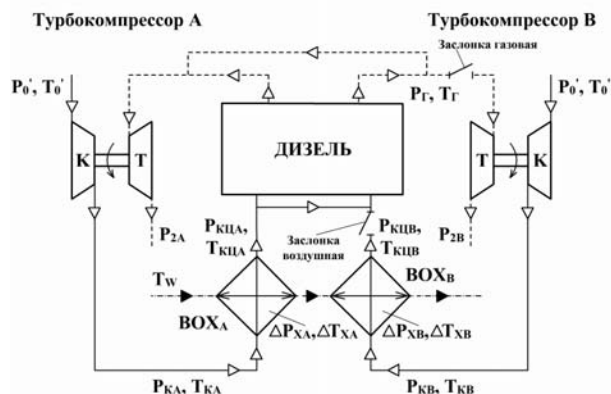


Рис. 1. Схема двигателя с регистровым наддувом:
 К — компрессор; Т — турбина; ВОХ — охладитель наддувочного воздуха

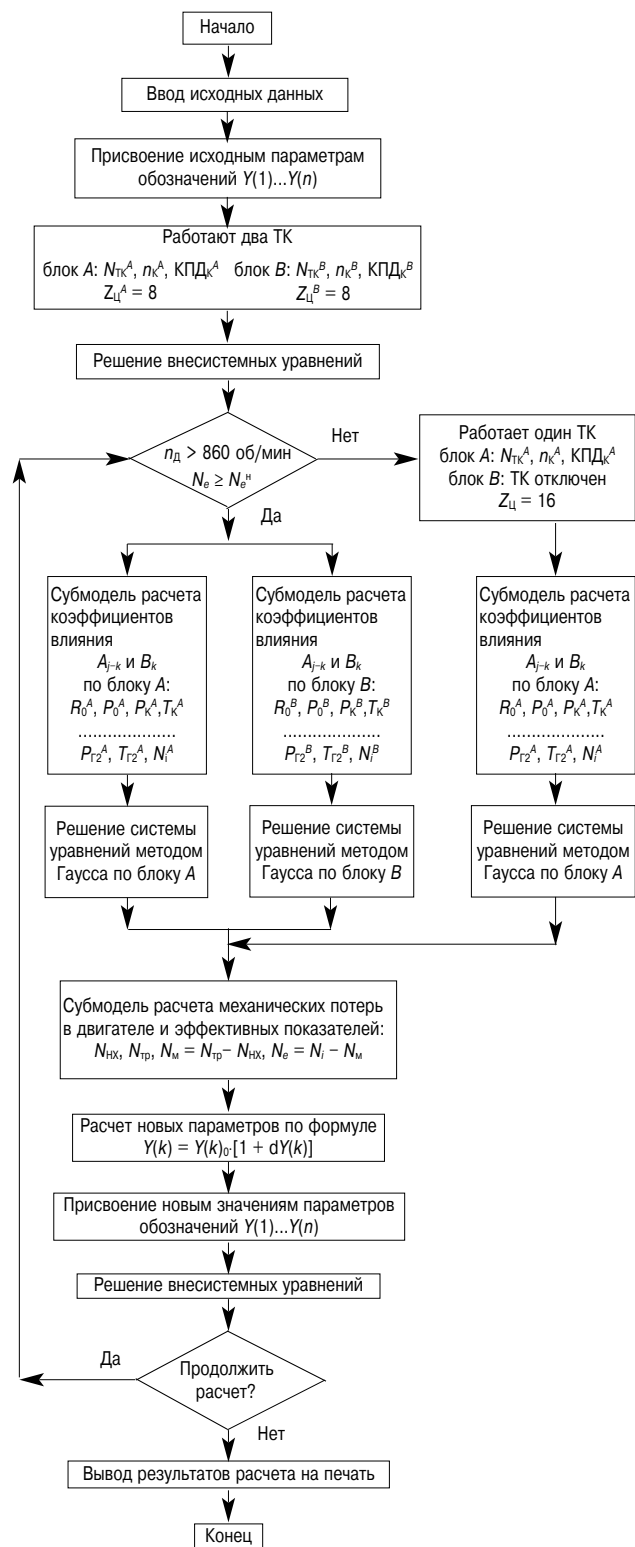


Рис. 2. Блок-схема ММ двигателя с регистровым наддувом

федре двигателей (внутреннего сгорания) ММ расчета эксплуатационных характеристик двигателей типа Д-42 с одноступенчатым СТК [4, 7, 8].

Эта ММ включает в себя систему из 55 уравнений и 41 внесистемного уравнения. Она от-

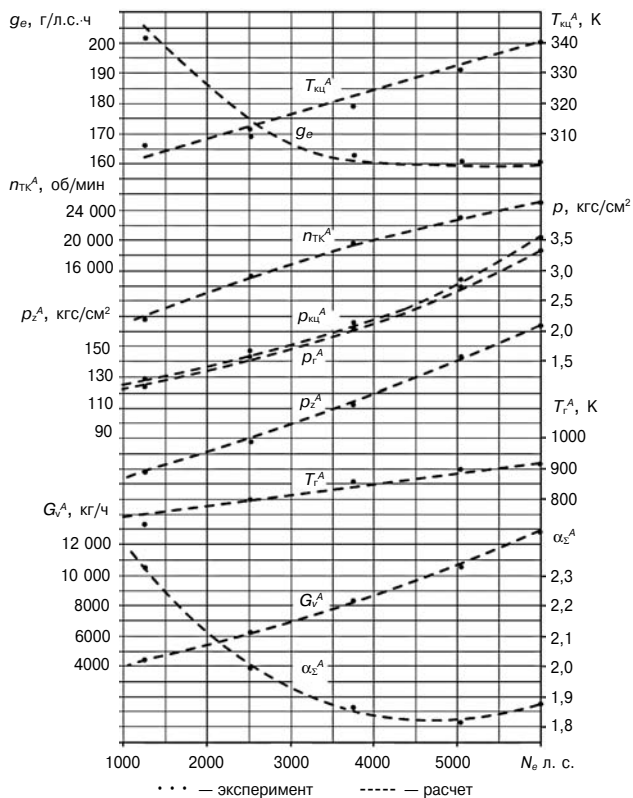


Рис. 3. Изменение показателей работы двигателя по нагрузочной характеристике при $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $t_{wz} = 32^\circ\text{C}$, $p_B = 1,03 \text{ кгс/см}^2$, $\varphi_0 = 0,28$

вечает всем основным требованиям, предъявляемым к математическим моделям (универсальности, адекватности исследуемому двигателю, воспроизводимости всего диапазона эксплуатационных режимов). Расхождение между результатами расчета и экспериментальными данными не превышает 3 % в диапазонах изменения эффективной мощности и частоты вращения коленчатого вала (КВ) двигателя от 100 до 40 %.

Литература

1. Портнов Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. — М. : Машгиз, 1963. — 640 с.
2. Васильев-Южин Р.М. Корабельные двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов. — Л. : ЛВВМИУ им. В.И. Ленина, 1989. — 309 с.
3. Васильев-Южин Р.М. Работа судового дизеля в неспецификационных условиях. — Л. : Судостроение, 1967. — 160 с.
4. Васильев-Южин Р.М., Байбури Ф.З. Разработка математической модели для исследования изменения основных параметров двух- и четырехтактных дизелей с различными схемами наддува при изменении внешних условий: отчет по НИР. — Л. : ЛВВМИУ им. В.И. Ленина, 1974.
5. Васильев-Южин Р.М., Байбури Ф.З., Воронович Н.А. Расчетное исследование возможностей форсирования дизеля 12ЧН32/32: отчет по НИР. — Л. : ЛВВМИУ им. В.И. Ленина, 1982.

От исходной ММ модель, описывающая работу дизеля 16Д49 во всем диапазоне указанных выше нагрузок, отличается тем, что:

- расчет всех показателей работы двигателя по блокам А и В, кроме механических потерь и эффективных показателей, ведется в системе уравнений;

- отдельно в субмодели рассчитываются механические потери и эффективные показатели для всего дизеля в целом.

Кроме того, при разработке этой ММ приняты следующие допущения (для моделирования установившихся режимов работы дизеля):

- в случае работы двигателя на режимах нагрузок более 70 % от полной мощности и при частоте вращения КВ $n_{д} > 875 \text{ об/мин}$ (работа с двумя ТК) охладитель воздуха условно разделяется на 2 параллельно работающих охладителя воздуха, ряда А и ряда В соответственно (см. рис. 1). При этом КПД воздухоохладителей $\eta_{Ax} > \eta_{Bx}$;

- отключение—подключение ТК ряда В происходит при $n_{д} \leq 875 \text{ об/мин}$; ($N_e \leq 0,7 N_e^n$) и считается мгновенным.

Блок-схема ММ двигателя с регистровым наддувом представлена на рис. 2.

Изменение основных показателей работы двигателя по нагрузочной характеристике при (для ряда А) приведено в виде графиков на рис. 3.

Предложенная ММ дает возможность:

- проводить расчетные исследования двигателя с регистровым наддувом в указанном диапазоне эксплуатационных режимов;

- исследовать момент отключения—подключения ТК ряда В (с помощью дополнительной динамической субмодели);

- оценивать влияние технического состояния турбокомпрессоров (изменение КПД компрессоров и турбин) на показатели работы двигателя.

6. Байбури Ф.З., Васильев-Южин Р.М. Эксплуатационные характеристики корабельных дизелей. — Л. : ЛВВМИУ имени В.И. Ленина, 1989. — 300 с.

7. Байбури Ф.З., Воронович Н.А., Кузнецов М.В. Программы для исследования работы ДВС с двумя ступенями наддува на ЭВМ типа ЕС: отчет по НИР. — Л. : ЛВВМИУ им. В.И. Ленина, 1984.

8. Байбури Ф.З., Кляцкий Д.А., Бузова Е.Ю. Расчетная оценка влияния противоаварийного на выпуск на показатели работы четырехтактных двигателей с различными схемами подключения агрегатов воздухообеспечения и газовыпуска: отчет по НИР. — СПб. Пушкин : ВМИИ, 2005.

9. Ципленкин Г.Е., Дейч Р.С., Иовлев В.И., Коженков А.А. Обзор докладов по газотурбинному наддуву на конгрессе СИМАС 2007 // Двигателестроение. — 2008. — № 3. — С. 29–35.

10. Дизель 16Д49-02. Техническое описание. Ч. 1. 16Д49-02.100ТО. — 70 с.

11. Дизель 16Д49-02. Техническое описание. Ч. 2. Альбом иллюстраций. 16Д49-02.100ТО1. — 111 с.