

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ В СУДОВОМ МАЛОБОРОТНОМ ДИЗЕЛЕ СО СРЕДНИМ ИНДИКАТОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ 20 БАР

А.А. Обозов, к.т.н.

ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод»

В.В. Рогалев, к.т.н., А.В. Клочков, аспирант
Брянский государственный технический университет

В статье приводятся результаты исследования процесса сжатия в цилиндрах современного судового малооборотного дизеля. Показана возможность получения адекватного описания процесса сжатия при отображении его в логарифмических координатах и использовании полиномов первой, второй и третьей степени. Дан анализ характера изменения показателя политропы процесса сжатия в функции от объема цилиндра.

В цилиндрах любого двигателя внутреннего сгорания в процессе сжатия происходит сложный теплообмен между рабочим телом и стенками деталей, образующих камеру сгорания. Рабочее тело, поступающее в цилиндр судового дизеля, имеет температуру порядка 40–50 °С, при этом стенки цилиндра и камеры сгорания нагреты до температуры в сотни градусов Цельсия. Поэтому в начальный период сжатия рабочее тело получает теплоту от стенок цилиндра. В процессе сжатия рабочее тело сильно нагревается, и в конце сжатия имеет температуру порядка 1000 °С, что значительно больше температуры стенок, т. е. в конце процесса сжатия более горячее рабочее тело отдает теплоту в стенку цилиндра. Подвод теплоты к рабочему телу увеличивает показатель политропы по сравнению с показателем адиабаты k (для воздуха $k = 1,4$), а отвод теплоты, соответственно, понижает показатель политропы. Таким образом, процесс сжатия с термодинамической точки зрения является политропическим и происходит с переменным показателем политропы.

При выполнении расчетов рабочего цикла широко используется методика Гриневецкого-Мазинга [1]. Согласно этой методике, рабочий цикл дизеля представляется состоящим из ряда термодинамических процессов, причем процесс сжатия рассматривается как политропический с постоянным (средним) показателем политропы n_{pol} . В литературе [1 и др.] существуют рекомендации по выбору величины n_{pol} . Средний

показатель политропы следует выбирать в диапазоне значений 1,32–1,39. Однако данные рекомендации получены на основании анализа работы двигателей со средним индикаторным давлением $p_{mi} \approx 10$ бар, характерным для двигателей, изготовлявшихся несколько десятилетий назад. В настоящее время судовые малооборотные дизели типа ДКРН, выпускаемые Брянским машиностроительным заводом по лицензии фирмы «MAN-Diesel A/S», достигли высокого уровня среднего индикаторного давления — величины 20 бар. Двигатель 6S50MC-C (6ДКРН 50/200-14) в режиме спецификационной максимальной длительной мощности (СМДМ) имеет следующие параметры: эффективная мощность 9480 кВт при частоте вращения коленчатого вала 127 об/мин; максимальное давление цикла 151 бар; давление надвучного воздуха 3,65 бар; среднее индикаторное давление 20,3 бар. Двигатель является крейцкопфным, сверхдлинноходовым (имеет отношение диаметра цилиндра к ходу поршня $S/D = 4$), характеризуется высоким значением максимального давления цикла и предельно высоким для одноступенчатых схем наддува давлением надвучного воздуха. Выполнение расчета рабочего процесса этого дизеля с использованием методики Гриневецкого-Мазинга при выборе рекомендуемых значений показателя политропы $n_{pol} = 1,32-1,39$ приводит к значительной погрешности в определении важнейших характеристик дизеля, сильно отличающихся от экспериментальных значений. На необходимость усовершенствования методики традиционного расчета рабочего цикла дизеля путем правильного описания процесса сжатия указывает ряд публикаций [2].

Целью настоящей работы является исследование изменения показателя политропы в процессе сжатия дизеля 6ДКРН 50/200-14 (6S50MC-C), имеющего высокую величину среднего индикаторного давления $p_{mi} = 20$ бар.

Исходной информацией при изучении термодинамических процессов в машинах является индикаторная диаграмма, т. е. изображение цикла

в координатах $p-v$ (давление—объем цилиндра). Известно, что небольшие отрезки любых кривых линий могут быть аналитически выражены уравнениями степенного вида [3, 4]. В частности, всегда можно выбрать такое число n , при котором уравнение $pv^{n_{pol}} = \text{const}$ достаточно близко воспроизводит разнообразные встречающиеся в практике линии индикаторных диаграмм. Если вся заданная кривая не может быть выражена единым уравнением, ее можно разбить на несколько интервалов, каждый из которых характеризуется своим показателем n_{pol} .

Для нахождения показателя политропы по заданной кривой процесса в координатах давление—объем ($p-v$) пользуются графическим способом. Логарифмируя почленно уравнение политропы, имеем $\lg p + n_{pol} \lg v = \text{const}$ (или $\lg p = -n_{pol} \lg v + \text{const}$). Следовательно, в координатах $y = \lg p$ и $x = \lg v$ политропа изображается в виде прямой линии с угловым коэффициентом, равным $-n_{pol}$, причем основание функции алгоритма и выбор масштабов для величин p и v не играет роли. Поэтому для построения логарифмической анаморфозы для определения показателя n_{pol} можно исходить из непосредственно измеряемых координат точек в $p-v$ -диаграмме. Кривую рассматриваемого процесса на плоскости в координатах $p-v$ обычно разбивают на ряд участков и по значениям параметров в начале и конце каждого участка вычисляют средние значения показателя политропы по уравнению

$$n_{pol} = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg v_2 - \lg v_1}$$

На рис. 1 показаны процессы сжатия в цилиндре исследуемого дизеля, полученные из индикаторных диаграмм при проведении стендовых испытаний на четырех режимах винтовой характеристики (50, 75, 100 и 110 % СМДМ). Экспериментальные индикаторные диаграммы регистрировались с помощью комплекса испытательной аппаратуры «PMI-System» (MAN-Diesel A/S).

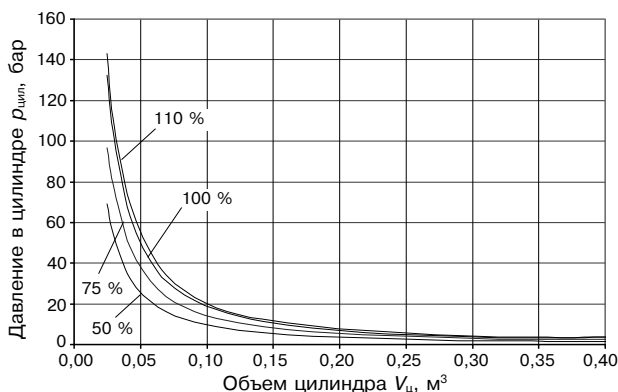


Рис. 1. Процессы сжатия в цилиндре судового малооборотного дизеля 6S50MC-C

После отображения процессов сжатия в логарифмических координатах они принимают вид, близкий к линейному. На рис. 2 приведена логарифмическая анаморфоза процессов сжатия, т. е. преобразование функциональной зависимости к виду $y = f(x)$, где $y = \lg(p_{ц})$; $x = \lg(v_{ц})$; $p_{ц}$ и $v_{ц}$ — текущие значения давления рабочего тела и объема цилиндра. Для операции логарифмирования использовалась функция десятичного логарифма. Из приведенных выше выкладок очевидно, что значение показателя политропы в каждой точке процесса сжатия равно тангенсу угла наклона касательных, проведенных к этим точкам, взятому с противоположным знаком, т. е. для расчета $n_{pol}(x)$ достаточно получить производную функцию вида $n_{pol}(x) = -[f'(x)]$.

При выполнении исследований экспериментальные кривые сжатия (отображенные в логарифмических координатах) аппроксимировались линейной функцией вида $y = Ax + B$, функциями второго порядка вида $y = Ax^2 + Bx + C$ и третьего — $y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$. Аппроксимация процессов линейной функцией уже дает достаточно удовлетворительные результаты. Квадрат коэффициента множественной корреляции при использовании полинома первой степени достигает значения 0,999 и выше. Стандартная ошибка аппроксимации в этом случае составляет 0,5–1 бар. Однако наибольшие остатки (невязки), характерные области высоких давлений в цилиндре, достигают 2–3 бар, что говорит о недостаточной точности линейной аппроксимации. Применение полинома второй степени заметно улучшает качество аппроксимации процесса: в этом случае стандартная ошибка и остатки аппроксимации не превышают 0,5 бар. Применение полинома третьей степени, как правило, не уменьшает стандартную ошибку аппроксимации,

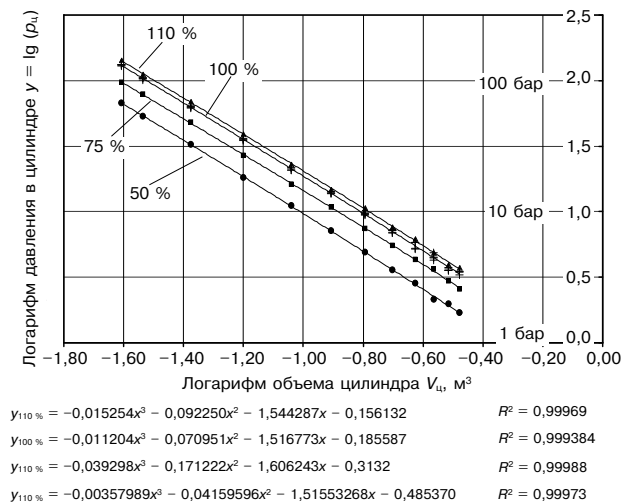


Рис. 2. Отображение процессов сжатия в цилиндре судового малооборотного дизеля 6S50MC-C в логарифмических координатах

однако несколько снижает величину максимального остатка. Квадрат множественного коэффициента корреляции при использовании полинома третьей степени не ниже уровня 0,9995. Применение полиномов степени выше третьей, как показали исследования, нецелесообразно. Рис. 3 отображает зависимость качества аппроксимации от степени используемого полинома. Следует отметить, что метод наименьших квадратов (МНК) применялся для поиска минимума суммы квадратов остатков функции логарифма от давления, а не самой величины давления, в связи с чем наблюдается увеличение размеров остатков аппроксимации в области высоких давлений в цилиндре (в области ВМТ). Функция, описывающая изменение показателя политропы процесса сжатия $n_{pol}(x)$, получается, как уже было отмечено выше, дифференцированием полученных полиномиальных зависимостей. Так, для режима 100 % СМДМ она имеет вид:

$$n_{pol} = 0,03361311 \lg(V_{ц})^2 + 0,14190 \lg(V_{ц}) + 1,5167.$$

На рис. 4 приведено семейство полученных функций $n_{pol}(x)$, соответствующих процессам сжатия для режимов винтовой характеристики. Жирной линией обозначена функция, соответ-

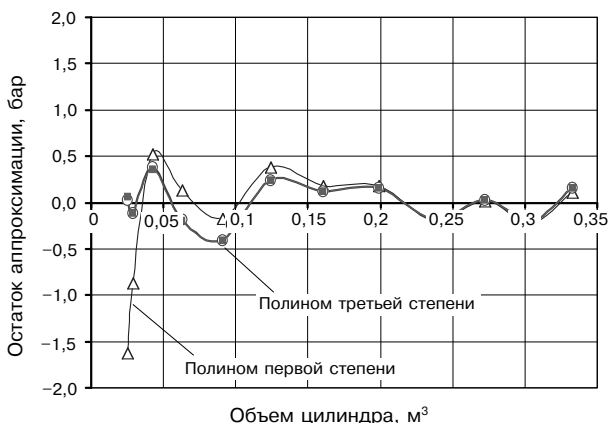


Рис. 3. Анализ зависимости остатков аппроксимации от вида применяемого полинома

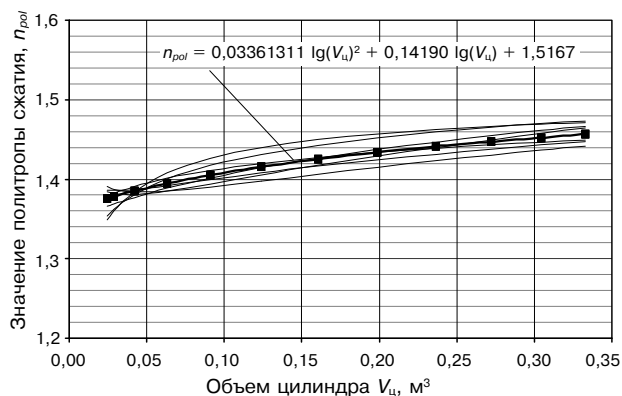


Рис. 4. Функции изменения показателя политропы сжатия судового малооборотного дизеля

ствующая режиму 100 % СМДМ (осредненный результат обработки четырех индикаторных диаграмм).

Из рис. 4 видно, что практически на всем протяжении процесса сжатия показатель политропы имеет значения выше 1,4. Средняя величина n_{pol} составляет $n_{pol} = 1,409$; максимальное значение показателя политропы $n_{pol} = 1,46$ имеет место в начале процесса сжатия, когда холодное рабочее тело поступает в цилиндр и наиболее интенсивно подогревается. Это свидетельствует о том, что рабочее тело на протяжении большей части процесса сжатия получает теплоту от стенок цилиндра. Только непосредственно вблизи верхней мертвой точки (ВМТ) показатель политропы сжатия снижается до величины $n_{pol} = 1,36$. Такая тенденция изменения показателя политропы сжатия наблюдается во всех режимах работы судового дизеля. В режиме 50 % СМДМ средняя величина n_{pol} составляет $n_{pol} = 1,417$; максимальное значение показателя политропы достигает $n_{pol} = 1,473$. Вблизи мертвой точки величина показателя политропы снижается до уровня $n_{pol} = 1,35$. Следовательно, на режиме 50 % СМДМ рабочее тело подогревается больше, чем на номинальном режиме работы дизеля (режиме 100 % СМДМ). Это объясняется тем, что частота вращения коленчатого вала снижается (со 127 об/мин до 100,8 об/мин) и, соответственно, увеличивается время контакта рабочего тела с горячими деталями камеры сгорания.

Значения давления в конце процесса сжатия p_{comp} могут быть рассчитаны по известной зависимости $p_{comp} = p_a \epsilon^{n_{pol}}$ (ϵ — степень сжатия, $\epsilon = 12,8$; p_a — давление в цилиндре в момент закрытия выпускного клапана). У судовых двухтактных малооборотных дизелей продувка происходит через окна втулки, нижний конец которой (с продувочными окнами) расположен непосредственно во впускном коллекторе большого объема, поэтому для данного класса двигателей инерционный наддув отсутствует, а гидравлические потери при проходе воздуха через окна относительно невелики. Поэтому можно считать, что давление в начале сжатия равно давлению надувочного воздуха, регистрируемого во впускном коллекторе. Тогда при расчете давления конца сжатия можно использовать формулу $p_{comp} = p_{scav} \epsilon^{n_{pol}}$ (p_{scav} — давление продувочного воздуха в ресивере). Для исследуемого двигателя для режима 100 % СМДМ давление конца процесса сжатия составляет

$$p_{comp} = p_{scav} \epsilon^{n_{pol}} = 3,65 \cdot 12,8^{1,409} = 132,4 \text{ бар.}$$

Если же воспользоваться рекомендуемым в литературе значением среднего показателя политропы сжатия, равным 1,37, то в результате расчета мы получим значение давления сжатия,

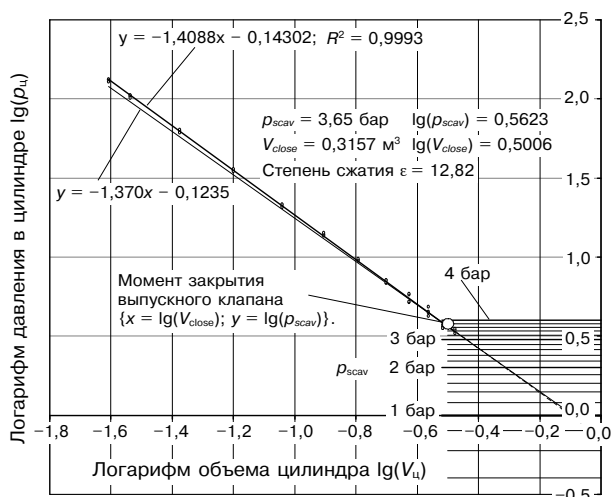


Рис. 5. Аппроксимации процесса сжатия полиномами первой степени с угловыми коэффициентами $-1,4088$ (МНК-оценка) и $-1,370$ (ранее рекомендованный)

равное $p_{comp} = 120,2$ бар, т. е. на 8 % ниже экспериментально определенной величины данного параметра. На рис. 5 приводится графическая иллюстрация аппроксимации процессов сжатия полиномами первой степени с угловыми коэффициентами, равными $-1,409$ (полученным МНК-оценкой) и $-1,37$ (согласно имеющимся литературным рекомендациям). Обе аппроксимирующие прямые берут свое начало в точке, соответствующей моменту закрытия выпускного клапана с координатами $\{x = \lg(V_{close}); y = \lg(p_{scaV})\}$. Как видно из рисунка, по мере уменьшения объема цилиндра (по мере сжатия рабочего тела) аппроксимирующие прямые расходятся и в районе ВМТ «накопленная» погрешность аппроксимации, соответствующая показателю $n_{pol} = 1,37$, составляет 12,2 бар.

С методической точки зрения представляет интерес коэффициент B аппроксимирующего полинома. Если аппроксимирующие прямые (рис. 5) продолжить вправо до пересечения с осью ординат при $x = \lg(V_u) = 0$, то ордината точки пересечения будет численно равна коэффициенту B .

Проведенные исследования показали, что средний показатель политропы (коэффициент A) процесса сжатия для режимов винтовой характеристики изменяется в узком диапазоне ($A = -1,39 \dots -1,42$). Четкой зависимости показателя политропы от режима работы дизеля не выявлено. Коэффициент B , в отличие от коэффициента A , функционально связан с режимом работы двигателя, так как зависит от давления в цилиндре в момент закрытия клапана (от давления наддува). Уравнение для определения коэффициента B имеет вид: $B = \lg(p_{scaV}) - A \lg(V_{close})$. На рис. 6, а, б приведены графики (построенные по экспериментальным данным), отражающие зависимость коэффициентов A и B от режима работы дизе-

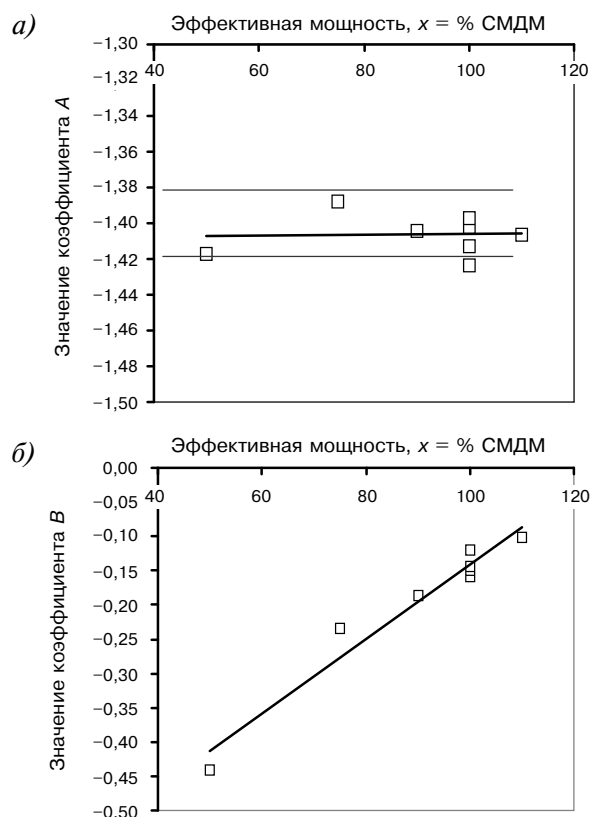


Рис. 6. Зависимости коэффициентов A (а) и B (б) от эффективной мощности (% СМДМ) дизеля

ля (% СМДМ). Коэффициент B имеет тесную корреляцию ($R^2 = 0,954$) с параметром, определяющим эффективную мощность двигателя (выявленная корреляция очевидна, так как коэффициент B функционально связан с давлением наддува).

Полученные взаимосвязи позволяют для исследуемого двигателя идентифицировать процесс сжатия для любого «текущего» режима работы, что может быть полезным при решении задач самого разнообразного плана (например, задач диагностирования технического состояния двигателя).

На величину показателя политропы сжатия оказывают влияние многие факторы: впрыск топлива, протечки рабочего тела, температура рабочего тела в конце процесса сжатия, удельная поверхность стенок камеры сгорания. На высокооборотных двигателях впрыск топлива производится с опережением и происходит не менее чем за 10–15 град ПКВ до ВМТ. После начала впрыска топлива в период задержки самовоспламенения (в процессе сжатия) имеют место затраты теплоты на его испарение, что понижает показатель политропы сжатия. В малооборотных дизелях типа ДКРН впрыск топлива начинается за 1–2 град ПКВ до ВМТ, т. е. отвод теплоты на испарение топлива в процессе сжатия не происходит. Кроме того, высокооборотные двигатели имеют обычно 2

компрессионных поршневых кольца, а на поршни малооборотных дизелей (МОД) устанавливают 4 компрессионных кольца (боковая сила поршня воспринимается крещкопфным механизмом), что значительно уменьшает утечки рабочего тела и способствует увеличению давления конца сжатия. Температура рабочего тела в конце сжатия у МОД значительно ниже, чем у других дизелей, из-за низкой степени сжатия. МОД характеризуются высокими значениями давления надвучного воздуха, с увеличением давления наддува возрастает массовое количество заряда, приходящееся на единицу площади поверхности стенок камеры сгорания, снижается относительный теплоотвод от рабочего тела. Все эти факторы приводят к «подводу теплоты» к рабочему телу в цилиндрах МОД и способствуют увеличению показателя политропы сжатия.

Заключение. Выполнено исследование процесса сжатия судового малооборотного дизеля 6S50MC-C. Для приближения результатов расчета процесса сжатия к экспериментальным

данным, средний показатель политропы сжатия для современных судовых малооборотных дизелей типа ДКРН со средним индикаторным давлением 20 бар в режиме номинальной мощности целесообразно принимать в диапазоне $n_{pol} = 1,39-1,42$, что соответствует реальным значениям, получаемым при обработке индикаторных диаграмм. Снижение нагрузки дизеля приводит к еще большему увеличению среднего показателя политропы сжатия.

Литература

1. Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. — М.: Машиностроение, 1983. — 372 с.
2. Контев К.Н. Усовершенствованная методика традиционного расчета рабочего цикла дизеля // Двигателестроение. — 1997. — № 4 — С. 21–24.
3. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1968. — 496 с.
4. Жуковский В.С. Термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983. — 304 с.

ЮБИЛЕЙ!

Николаю Ивановичу Троицкому 70 лет



17 января 2009 г. исполнилось 70 лет Троицкому Николаю Ивановичу, крупному специалисту в области транспортных двигателей и силовых установок, кандидату технических наук, академику Академии проблем качества, председателю Координационного Совета по проблемам развития перспективных силовых установок для объектов БТВТ, члену редакционных советов журналов «Двигатель» и «Двигателестроение», члену правления ассоциации «Союз авиационного двигателестроения», Генеральному директору ФГУП «Научно-исследовательский институт двигателей» (ФГУП НИИД)

Николай Иванович родился 17 января 1939 г. в п. Раздольное Приморского края. После окончания МВТУ им. Баумана в 1961 г. начал свой трудовой путь в НИИД, где занимался исследованиями и совершенствованием конструкций газотурбинных авиационных двигателей (ГТД). Им были выполнены работы по конвертации авиационных двигателей ГТД-3, ГТД-350 в силовые установки наземной военной техники, проведены испытания и доводка первых газотурбинных двигателей для ВГМ (ГТД-3Т, ГТД-700) и новых двигателей других модификаций. В области прикладных научных исследований им впервые были выполнены работы по изучению характеристик турбин с РСД на тормозных режимах и разработаны методы расчета характеристик ГТД со свободной турбиной, имеющей РСА. При его непосредственном участии были разработаны долгосрочные программы работ по созданию и модернизации двигателей БТВТ, выполнены НИОКР по созданию научно-технического задела по проблемным вопросам развития двигателей и силовых установок с ГТД.

Николай Иванович автор более 180 научных работ и изобретений в области газотурбинных и дизельных двигателей. В плотном рабочем графике директора НИИД находится время для преподавательской работы в МГТУ им. Баумана на кафедре Э-3 «Газотурбинные двигатели и нетрадиционные источники энергии» и для общественной работы в качестве заместителя председателя ГАК.

Коллектив ФГУП НИИД и редакция журнала «Двигателестроение» поздравляют Николая Ивановича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья и творческого долголетия