

- icirovaniyasudovyhdizelej, TransportnyjbiznesvRossii, Special'noeizdanie, Novorossiysk, GMUimeniadmiraF.F.Ushakova, 2003.
3. Korolyov V.I., Tarani-
n A.G. Trenazhyornayapodgotovkavahtennyhmekhan
ikovsispol'zovaniemtrenazhyoramashinnogootdele-
niya. CHast' 2, Novorossiysk, GMUimeni-
admiraF.F.Ushakova, 2010.
 4. Vas'kevich F.A. Regulirovka diagnostikasudovyh
dizelej poustanovivshemsyaekspluatatsionnympar-
ametr, TransportnyjbiznesvRossii, Special'noeiz-
danie, Novorossiysk, GMUimeni-
admiraF.F.Ushakova, 2003.
 5. Korolyov V.I., Tarani-
n A.G. Bezvahtennoe obslu-
zhivanie sudovyh energeticheskikh ustanovok. CHast'
1, Novorossiysk, GMUimeniadmiraF.F.Ushakova,
2011.
 6. Vas'kevich F.A., Gordynskij V.M., Ocenkapogresh-
nostiregulirovkiindikatornogoprivodaglavnyh, Spe-
cial'nayarabochayakniga «Usovershenstvovanie su-
dovyyh energeticheskikh ustanovok sistem », Moskva,
Mortekhinformreklama, 1991.
 7. Korolyov V.I., Tarani-
n A.G. Bezvahtennoe obslu-
zhivanie sudovyh energeticheskikh ustanovok. CHast'
2, Novorossiysk, GMUimeniadmiraF.F.Ushakova,
2011.
 8. Kondrat'ev S.I. Maksimizatsiya nadezhnosti pro-
cessov v usloviyakh mezh sistemnykh v zaimodejst-
vijsnevnopolneopredelennymiparametrami [Tekst] /
S.I. Kondrat'ev, A.P. Lickevich V sbornike: Strate-
giyarazvitiyatransportno-
logisticheskoy sistemy Azovo-
Chernomorskogobassejna. Problemy bezopas-
nostimorskogosudohodstva, tekhnicheskoy kom-
mercheskoj ekspluatatsii morskogo transporta Materi-
aly 1-j mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy 6-
j regional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Ot-
vetstvennyye zavypusk: akademik RAT, d.t.n., prof.
V.V. Dem'yanov, akademik RAT, d.e.n., prof.
V.E. Deruzhinskij. 2007. S. 204-207.
 9. Karakaev A.B., Hekert E.V., Lukani-
n A.V. Razrabotka metodologii, metodov i modelej ana-
lizavlianiy arazlichnykh variantov postroeni-
ya struktury irezhimov podderzhaniya i vosstanovleni-
ya rabotosposobnostisudovyhelektroenergetich-
eskihsistem (CHast' 2) / Eksploatatsiya morskogo
transporta. 2016. № 4 (81). S. 85-95.
 10. Ivakin YA.A., Oparin A.I., Pechnikov A.N., Pechni-
kov D.A., Potapychiev S.N., Hekert E.V. Raschet
pokazatelej bezavarijnosti sovmestnogo
ispol'zovaniya obitaemykh i robotizirovannykh sredstv
provedeniya podvodno-tekhnicheskikh rabot (SRTK :
CONTROL OF ANPA AND APA) Svidetel'stvo o
registratsii programmy dlya EVM RU 2016619129,
15.08.2016. Zayavka № 2016616771 ot 27.06.2016.
 11. Ivakin YA.A., Oparin A.I., Pechnikov A.N., Pechni-
kov D.A., Potapychiev S.N., Hekert E.V. Analiticheskoe
planirovanie sovershenstvovaniya
kachestva programmno-informatsionnogo
obespecheniya morskikh robotizirovannykh tekhnolog-
icheskikh kompleksov dlya podvodnykh rabot (PLAN
FOR QUALITY OF SRTK SOFT-
WARE) Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya
EVM RU 2016619651, 25.08.2016. Zayavka №
2016617519 ot 27.06.2016.

УДК 629.12-8

DOI: 10.34046/aumsuomt94/16

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ SO_x, CO И CO₂ В АТМОСФЕРУ

А.Г.Таранин, кандидат технических наук, доцент

Методы снижения вредных выбросов в атмосферу с выпускными газами ДВС были предложены различными изданиями и публикациями заводов-изготовителей ещё 25 лет назад. Многие из них используются по настоящее время в зависимости от затрат на их установку, использование и техническое обслуживание. За 25 лет практического применения методов снижения выбросов на судах определило состоятельность и рентабельность дальнейшего их использования. Предлагаемый метод снижения выбросов SO_x в атмосферу напрямую связан с используемым топливом, т.е. при снижении содержания серы в топливе снижаются и выбросы SO_x, что является задачей не судовладельцев а нефтеперерабатывающих производств и бункеровочных компаний. Снижение выбросов CO и CO₂ является краеугольной задачей, т.к. качество и низшая теплотворная способность топлива определяются содержанием углерода и водорода. Таким образом, снижение содержания углерода и водорода приведёт к снижению качества и низшей теплотворной способности топлива. А потому все эти 25 лет для снижения выбросов CO и CO₂ с выпускными газами судовых ДВС ставилась задача их энергоэффективности. Предлагаемый нами метод может позволить решить задачу снижения выбросов CO и CO₂ на частичных и номинальных режимах работы дизелей.

Ключевые слова: Вредные выбросы с выпускными газами ДВС, окислы углерода, низшая теплотворная способность топлива, метод снижения выбросов, тепловой баланс двигателя.

The Diesel Engines (ICE) exhaust gases atmosphere noxious emission decreasing ways were introduced by the different editions and engine manufacturer publications already 25 years ago. Many of that have used up to present depend of its installation, usage and maintenance costs. For the mentioned above 25 years of emission decreasing ways practical using on the vessels has identified it further usage consistency and profitability

(efficiency). The atmosphere noxious emission proposed decreasing way is directly connected with using fuel oil, i.e. at the fuel oil sulphur content decreasing the SO_x emission has decreasing too, that is task not for ship owners, but for petroleum-refining manufactures and bunkering companies. CO and CO₂ emission decreasing is a corner task, as a fuel oil quality and lower calorific value are identified by the carbon & hydrogen content. Thus the fuel oil carbon and hydrogen content decreasing will bring to the decreasing of a quality and lower calorific value. Therefore all of this 25 years for the vessels diesel engines (ICE) exhaust gases CO & CO₂ emission decreasing the energy efficiency task is stated. Our proposed way can allow to resolve the CO & CO₂ emission decreasing task for the engines operation parts of loads and nominal loads.

Keywords: ICE (Diesel Engines) exhaust gases noxious emission, carbon oxides, fuel oil Lower Calorific Value, emission decreasing way, engine heat balance.

Введение

В отработавших газах ДВС с помощью специальных методов исследования обнаружено около 200 компонентов. По характеру воздействия и химической структуре они делятся на шесть основных групп.

Первую группу составляют нетоксичные вещества: азот N₂, кислород O₂, водород H₂, водяной пар, а также углекислый газ CO₂. При увеличении содержания CO₂, по мнению ученых, может к 2200 г. повысить температуру на 1°C.

Ко второй группе относится окись углерода CO бесцветный газ, без вкуса и запаха, легче воздуха, практически нерастворимый в воде. Оказывает вредное воздействие на организмы.

В третью группу входят окислы азота, главным образом окись и двуокись. Двуокись азота NO₂ – красновато-бурого цвета. С характерным запахом, тяжелее воздуха. Попадая в организмы и вступая в реакцию с водой, окислы азота образуют в дыхательных путях соединения азотной и азотистой кислот.

К четвёртой группе, самой многочисленной относятся различные углеводороды, являющиеся представителями всех гомологических родов: алканов, алкенов, алкадиенов, цикланов, а также ароматических соединений, в том числе концентратенов.

В пятую группу входят альдегиды. В отработавших газах присутствуют в основном формальдегид акролеин.

В шестую группу выделяют сажу. Она состоит из частичек твёрдого углерода, который не представляет непосредственной опасности для организмов. Как всякая аэрозоль, сажа загрязняет воздух, ухудшает видимость, и главная опасность сажи заключается в том, что она является переносчиком канцерогенных веществ.

В состав отработавших газов дизелей при использовании сернистых топлив входят также неорганические газы: сернистый ангидрид SO₂ и сероводород H₂S. Сернистый ангидрид бесцветный газ с острым запахом, тяжелее воздуха, хорошо растворяется в воде, образуя сернистую кислоту.

Основной причиной неполного сгорания топлива и увеличения токсичности отработавших газов, даже при значительном коэффициенте избытка воздуха – плохое смесеобразование.

Нарушение смесеобразования характерно для переходных режимов работы двигателя, а в частности, режима обкатки ГД. Экспериментальные данные показывают, что с увеличением нагрузки двигателя концентрация главных составляющих вредных веществ, перечисленных выше, в отработавших газах снижается. Доказано, что с увеличением нагрузки концентрация окиси углерода падает, потом получает стабильный характер до некоторого предельного значения среднего эффективного давления, а при перегрузке вновь несколько увеличивается. Концентрация окислов азота при больших значениях среднего эффективного давления продолжает снижаться. Это объясняется тем, что при форсировании двигателя концентрация кислорода в камере сгорания значительно уменьшится.

Таким образом, меньшая токсичность газов характерна для режима полного хода. Опыт эксплуатации двигателя показывает, что большое количество вредных веществ выделяется при пуске двигателя, особенно когда он недостаточно прогрет. Но нельзя обойтись без пуска, ресивера и работы на небольших нагрузках. Таким образом, загрязнение окружающей среды во время работы на этих режимах неизбежно, но возможно сократить время работы на этих режимах

Основные положения.

Все судовые операции должны проводиться в соответствии с Приложением VI МАРПОЛ, и национальными / региональными требованиями. В основном это касается сокращения следующих выбросов:

- 1) Окислы азота NO_x;
- 2) Окислы серы SO_x;
- 3) Окислы углерода CO_x;
- 4) Углекислый газ CO₂;
- 5) Вещества, разрушающие озоновый слой / хладагенты

1. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ SO_x В АТМОСФЕРУ

Использование ЭНСДТ – экстремально низкосернистое дизельное топливо (ULSMGO) с содержанием серы:

- < 0,5% для мирового использования.
- < 0,1% для использования в специальных зонах контроля выбросов в атмосферу.

Использование двухтопливных двигателей, для чего требуется:

- Закупка или проектирование и производство современных двухтопливных дизелей.
- Разработка и проектирование систем хранения, перекачки, подачи к ДВС газового топлива.

– Разработка и проектирование береговых и плавучих средств хранения, перекачки и bunkеровки газовым топливом.

2. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO₂ И СО В АТМОСФЕРУ

Использование двигателей с наибольшей эффективностью.

– По возможности с повышенным углом опережения подачи топлива.

– Использование двигателей на нагрузках, близких к НЭМ = 85%МЭМ.

– Модернизация наддува двигателя завышенной подачи воздуха на частичных режимах эксплуатации двигателей (форсирование по наддуву).

– Использование оригинальных запасных частей завода-изготовителя, влияющих на рабочий процесс в цилиндрах двигателя.

– Следить за регулировкой двигателя на постоянной основе, которая должна соответствовать заводской регулировке.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ С НАИБОЛЬШЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Данный метод может быть высказан как идея, которая может подтвердиться только предварительным тепловым расчётом ДВС и расчётом теплового баланса ГТН данного ДВС, а также затрагивает один из выше перечисленных пунктов, таких как – Модернизация наддува двигателя завышенной подачи воздуха на частичных режимах эксплуатации двигателей (форсирование по наддуву).

1) Повышение эффективности ДВС изменением величин, влияющих на мощность двигателя:

$$N_{IND} = k \cdot P_{IND} \cdot n \cdot i \text{ (и.л.с)}$$

где: $k = 1,745 \cdot D^2 \cdot S \cdot m$ – постоянная цилиндра (–);

D – диаметр цилиндра (мтр);

S – ход поршня (мтр);

m – тактность двигателя (4-тактный $m = 2$, 2-тактный $m = 1$);

P_{IND} – средне-индикаторное давление (кг/см²);

n – частота вращения двигателя (об/мин);

i – число цилиндров двигателя (–).

$$\Rightarrow N_{IND} = k \cdot P_{IND} \cdot n \cdot i = 1,745 \cdot D^2 \cdot S \cdot P_{IND} \cdot m \cdot n \cdot i \text{ (и.л.с)}$$

а) Повышение мощности за счёт увеличения диаметра цилиндра – D . Метод использовался около 50 лет, что привело к наибольшему диаметру 90см для двигателей MAN-B&W и SULZER и к увеличению массы двигателя. Дальнейшее увеличение диаметра цилиндра было не рентабельным.

б) Повышение мощности за счёт увеличения хода поршня – S . Метод использовался около 40 лет, что привело к созданию длинноходовых и супер длинноходовых моделей типа LMC и SMC (отношение $S/D \approx 4$) двигателей MAN-B&W и SULZER, и тоже к увеличению массы двигателя. Дальнейшее увеличение хода поршня было не рентабельным.

в) Повышение мощности за счёт увеличения частоты вращения – n . Метод не логичен для МОД и СОД.

г) Повышение мощности за счёт увеличения числа цилиндров – i . Метод использовался до определённого момента, и тоже ведёт к увеличению массы двигателя. Дальнейшее увеличение числа цилиндров не рентабельно.

д) Все выше перечисленные методы можно отнести к повышению энерго-эффективности, а также к повышению индикаторного КПД двигателя, потому как при постоянном средне-индикаторном давлении (в классической теории – постоянном расходе топлива) повысили индикаторную мощность. Повышение мощности за счёт увеличения средне-индикаторного давления P_{IND} нельзя отнести к повышению энерго-эффективности по следующей причине. Увеличение средне-индикаторного давления P_{IND} может быть достигнуто увеличением площади индикаторной диаграммы за счёт повышения давления сгорания или за счёт увеличения продолжительности впрыска и горения топлива в цилиндре (увеличения цикловой подачи или расхода топлива). И тот и другой методы не безграничны – по давлению сгорания из-за ограничений в прочности крышки и втулки цилиндра – по продолжительности впрыска из-за увеличения температуры выпускных газов, т.е. потерь тепла, если не менять углы газораспределения, а значит и КПД дизеля может остаться неизменным.

е) Подойдём к повышению энерго-эффективности и КПД дизеля с другой стороны –

попытаемся при неизменном средне-индикаторном давлении снизить продолжительность впрыска и горения топлива в цилиндре (снизить цикловую подачу или расход топлива). Добившись каких-то положительных результатов в решении этого вопроса, мы сразу же достигнем снижения выбросов CO_2 , CO и NO_x в атмосферу за счёт снижения расхода топлива на получение той же мощности. Этот способ уже 20 лет назад получил своё развитие за счёт форсирования двигателя по давлению наддува, подняв его с 1,8 бар до 2,9÷3 бар. Понятно, что чем больше воздуха участвует в горении топлива, тем более полное сгорание топлива, меньше потерь тепла с уходящими газами, больше тепла идёт на полезную работу, больше скорость горения, а значит

меньше продолжительность горения (меньше температура уходящих газов). Продолжим наше предположение о повышении степени наддува и вытекающих из этого последствий на примере первоначальных теоретических выкладок без предварительного теплового расчёта ДВС и расчёта теплового баланса ГТН данного ДВС.

2) Идея повышения степени наддува.

Рассмотрим идею повышения степени наддува на примере двигателя HYUNDAI MAN-B&W 6S50MC (МЭМ 11640 э.л.с. МЧВ 127 об/мин). На рисунке 1 представлены индикаторные диаграммы данного ГД-ля и сводная таблица основных параметров индицирования, снятые во время эксплуатации.

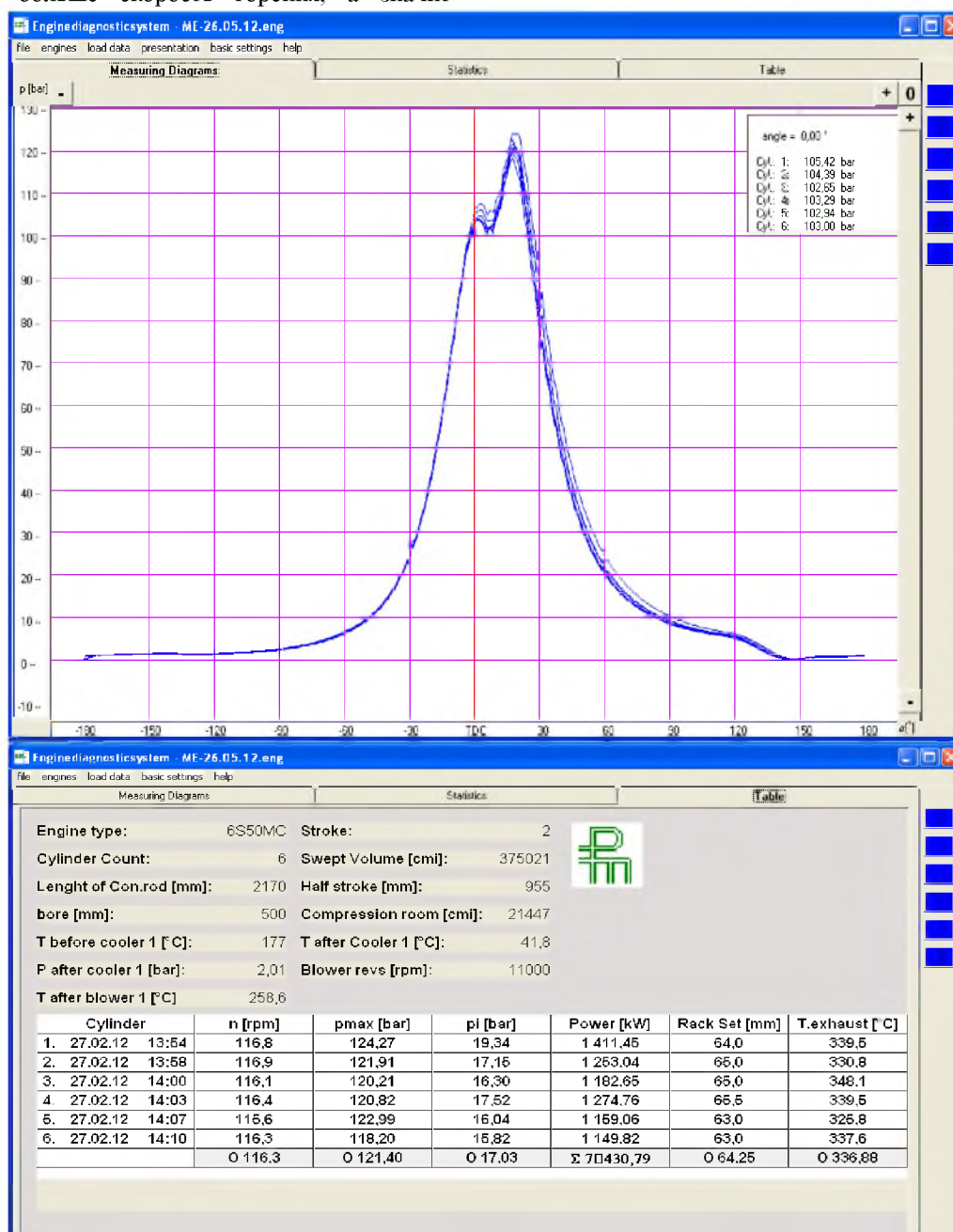


Рисунок 1 – реальная индикаторная диаграмма и параметры индицирования

- а) Частота вращения:
116,3 об/мин = 91,58% МЧВ;
б) Индикаторная мощность двигателя:
10103 и.л.с = 7431 иКвт = 86,8% МЭМ;
в) Давления сжатия цилиндров:
 $P_{COM}^1 = 105,42$ бар;
 $P_{COM}^2 = 104,39$ бар; $P_{COM}^3 = 102,65$ бар;
 $P_{COM}^4 = 103,29$ бар; $P_{COM}^5 = 102,94$ бар;
 $P_{COM}^6 = 103$ бар; $P_{COM}^{AV} = 103,62$ бар;
г) Давления сгорания цилиндров:
 $P_{MAX}^1 = 124,27$ бар;
 $P_{MAX}^2 = 121,91$ бар;
 $P_{MAX}^3 = 120,21$ бар;

- $P_{MAX}^4 = 120,81$ бар;
 $P_{MAX}^5 = 122,99$ бар;
 $P_{MAX}^6 = 118,2$ бар;
 $P_{MAX}^{AV} = 121,4$ бар;
д) Давление наддувочного воздуха:
 $P_{SC} = 2,01$ бар;
е) Угол воспламенения топлива:
 $\phi_{INJ} = 2^\circ$ после ВМТ;
ж) Представим себе форсирование двигателя по наддуву и изменение параметров на данном режиме: среднее значение давления сжатия по цилиндрам достигло среднего значения сгорания $P_{COM}^{REC} = P_{MAX}^{AV} = 121,4$ бар (рисунок 2(б));

- требуемое повышение давления наддува для достижения предполагаемого изменения давления сжатия $P_{COM}^{REC} = 121,4$ бар:

$$\varepsilon_{n1} = \frac{P_{COM}^{AV} + P_{AMB}}{P_{SC} + P_{AMB}} = \frac{103,62 + 1,017}{2,01 + 1,017} = 34,567889 (-) - \text{отношение}$$

абсолютных давлений

$$P_{SC}^{REC} = \frac{P_{COM}^{REC} + P_{AMB}}{\varepsilon_{n1}} - P_{AMB} = \frac{121,4 + 1,017}{34,567889} - 1,017 = 2,52 \text{ (бар)} -$$

рекомендуемое давление наддува для форсирования ГД – для то есть для достижения давления сжатия от существующего $P_{COM}^{AV} = 103,62$ бар до рекомендуемого $P_{COM}^{REC} = 121,4$ бар, необходимо поднять давление наддува на данном режиме от $P_{SC} = 2,01$ бар до $P_{SC}^{REC} = 2,56$ бар.

з) Изменим угол опережения подачи топлива, чтобы угол воспламенения был не 2° после ВМТ, а значительно позже на линии расширения для достижения давления сгорания того же значения что и давления сжатия

$$P_{MAX}^{REC} = P_{COM}^{REC} = 121,4 \text{ бар (рисунок 2(б));}$$

и) При форсировании двигателя по наддуву в том виде, который мы предлагаем, можно предположить следующие последствия:

- площадь индикаторной диаграммы, характеризующей средне-индикаторное давление, зависит от количества горючих газов, складываемого из количества подаваемого топлива и количества наддувочного воздуха, участвующего в смесеобразовании и горении смеси за цикл:
 $G_{CG} = G_{FO} + G_{SCA}$;

– можем предположить, что для двигателя, работающего по внешней винтовой характеристике (при закреплённой РТН), при увеличении количества наддувочного воздуха, участвующего в смесеобразовании и горении смеси при неизменном количестве горючих газов (неизменных площади индикаторной диаграммы и средне-индикаторного давления), расход топлива снизится;

– из выше сказанного осмелимся сделать вывод, что при увеличении количества наддувоч-

ного воздуха и снижении количества топлива, участвующих в смесеобразовании и горении смеси при неизменном количестве горючих газов (неизменных площади индикаторной диаграммы и средне-индикаторного давления), увеличивается полнота сгорания топлива, снижается температура выпускных газов, и то и другое ведёт к снижению выбросов CO_2 , CO_x и NO_x в атмосферу. Подтверждение выше сказанного формулой индикаторной мощности при условии постоянной нагрузки на двигатель:

$$N_{IND} = LCV_{FO} \cdot G_{FO} - Q_{EXH} - Q_{CW} - Q_{LO} = \text{const}$$

где: LCV_{FO} – низшая теплотворная способность топлива;

- G_{FO} – расход топлива;
 Q_{EXH} – потери энергии с выпускными газами;
 Q_{CW} – потери энергии с охлаждающей водой;
 Q_{LO} – потери энергии со смазочным маслом.

Вывод: При снижении температуры выпускных газов, а, следовательно, и потерь энергии с выпускными газами Q_{EXH} , чтобы сохранить условие условия $N_{IND} = \text{const}$, необходимо снизить расход топлива G_{FO} .

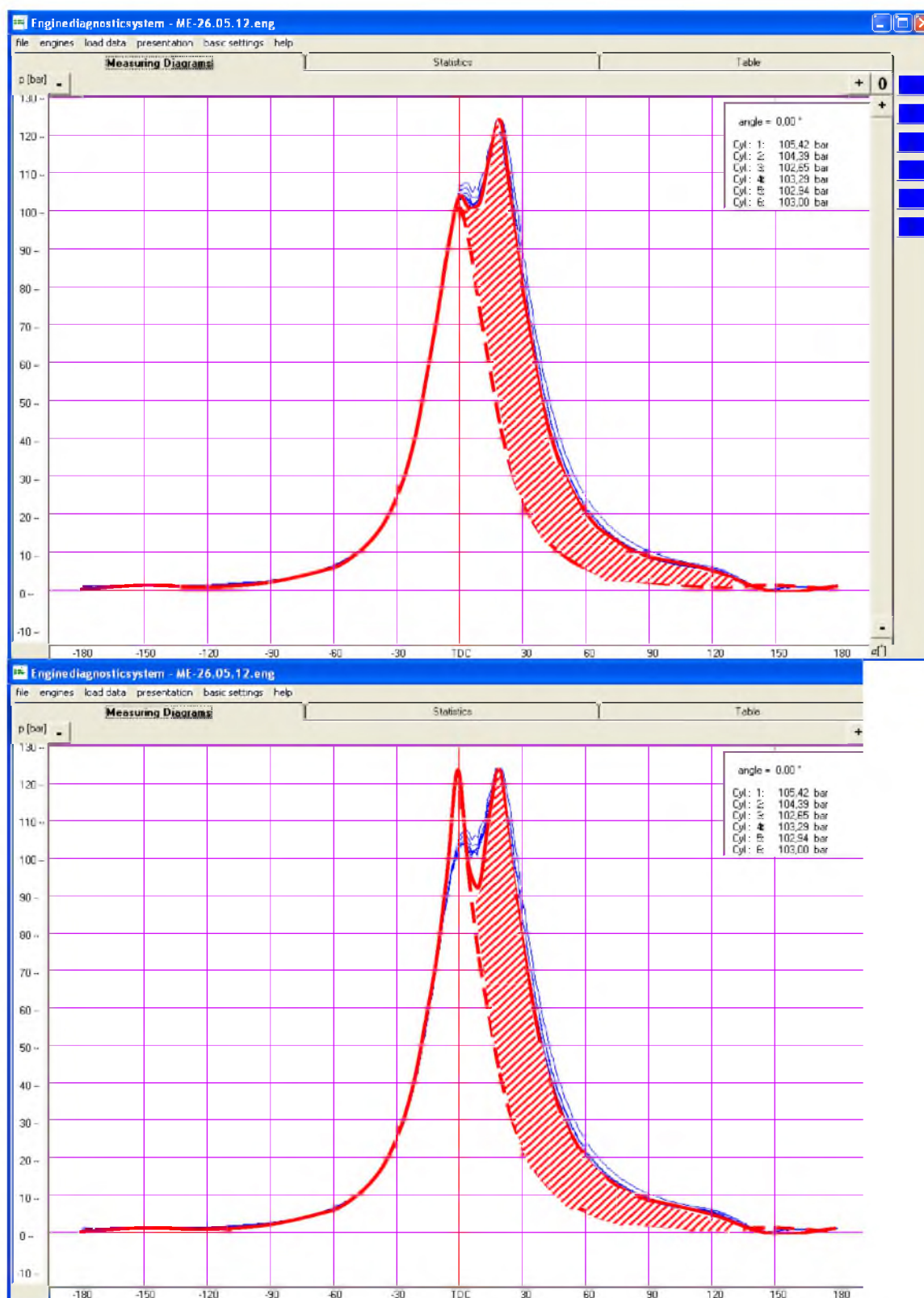


Рисунок 2(а) – реальная индикаторная диаграмма; (б) – предполагаемая ИД

к) При форсировании двигателя по наддуву в том виде, который мы предлагаем, можно предположить, что коэффициент наполнения цилиндра двигателя перед закрытием продувочных окон увеличится. В этом случае также мо-

жем предложить позднее открытие выпускного клапана, тем самым увеличив полезный ход поршня и раннее его закрытие, тем самым увеличив степень сжатия, конструктивно изменив профиль кулака привода выпускного клапана.

3) Первоначальные действия для подтверждения высказанной идеи:

а) предварительный тепловой расчёт ДВС и расчёт теплового баланса ГТН данного ДВС;

б) без каких-либо больших дополнительных затрат проверить работу двигателя с известными уже результатами стендовых испытаний (чтобы подтвердить высказанную нами идею) во время его форсирования по наддуву на повторном испытательном стенде, создав предполагаемое постоянное давление наддува для выбранной нагрузки в продувочном ресивере любым внешним источником, скажем от баллонов пускового воздуха через редукционный клапан;

в) после предполагаемого положительного результата рассчитать предполагаемые постоянные давления наддува в продувочном ресивере тем же внешним источником и предполагаемые индексы VIT для ряда частичных нагрузок и выполнить испытания для выбранного ряда;

г) система VIT скорее всего должна работать по обратно-пропорциональной зависимости от нагрузки, т.е. уменьшение индекса при увеличении нагрузки, в отличие от классической зависимости – повышение индекса при повышении нагрузки от 0 до 75%, и его дальнейшее снижение при нагрузках выше 75%.

Выводы

Представленный вашему вниманию метод снижения выбросов CO и CO₂ требует теоретически расчётного и исследовательского подтверждения. Последний может быть выполнен при наличии дизельной лаборатории – мини МО или при сотрудничестве с дизелестроительными компаниями.

Литература

1. Королёв В.И., Таранин А.Г. Тренажёрная подготовка вахтенных механиков с использованием тренажёра машинного отделения. Часть 1. – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2010.
2. Самойленко А.Ю. Влияние индикаторного канала на результаты индизирования судовых дизелей, Транспортный бизнес в России, Специальное издание. – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2003.
3. Королёв В.И., Таранин А.Г. Тренажёрная подготовка вахтенных механиков с использованием тренажёра машинного отделения. Часть 2. – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2010.
4. Васькевич Ф.А. Регулировка и диагностика судовых дизелей по установившемуся эксплуатационным параметрам, Транспортный бизнес в России, Специальное издание. – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2003.

5. Васькевич Ф.А., Гордынский В.М. Оценка погрешности регулировки индикаторного привода главных, Специальная рабочая книга «Усовершенствование судовых энергетических установок и систем». – М.: Мортехинформреклама, 1991.

6. Кондратьев С.И. Максимизация надёжности процессов в условиях межсистемных взаимодействий с не вполне определёнными параметрами [Текст] / С.И. Кондратьев, А.П. Лищкевич: В сборнике: Стратегия развития транспортно-логистической системы Азово-Черноморского бассейна. Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта Материалы 1-й международной научно-технической и 6-й региональной научно-технической конференции. Ответственные за выпуск: академик РАТ, д.т.н., проф. В.В. Демьянов, академик РАТ, д.э.н., проф. В.Е. Деружинский. – 2007. – С. 204-207.

7. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Луканин А.В. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (Часть 2) // Эксплуатация морского транспорта. – 2016. – № 4 (81). – С. 85-95.

8. Каракаев А.Б. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (Часть 1) [Текст] / А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. – 2017. – № 2 (83). – С. 114-122.

9. Панамарев В., Хекерт Е.В. Расчёт концентрации окислов азота для котельной установки Aalborg Missionol с топочным устройством kbsd-1900 и сравнение с экспериментальными данными // Эксплуатация морского транспорта. – 2015. – № 3 (76). – С. 75-79.

REFERENCES

1. Korolyov V.I., Taranin A.G., Trenazhyornaya podgotovka vahtennykh mekhanikov s ispol'zovaniem trenazhyora mashinnogo otdeleniya. CHast' 1, Novorossiysk, GMU imeni admirala F.F. Ushakova, 2010.
2. A.YU. Samojlenko, Vliyanie indikatornogo kanala na rezul'taty indicirovaniya sudovykh dizelej, Transportnyj biznes v Rossii, Special'noe izdanie, Novorossiysk, GMU imeni admirala F.F. Ushakova, 2003.
3. V.I. Korolyov, A.G. Taranin, Trenazhyornaya podgotovka vahtennykh mekhanikov s ispol'zovaniem trenazhyora mashinnogo otdeleniya. CHast' 2, Novorossiysk, GMU imeni admirala F.F. Ushakova, 2010.
4. F.A. Vas'kevich, Regulirovka i diagnostika sudovykh dizelej po ustanovivshemsya ekspluatatsionnym parametram, Transportnyj biznes v Rossii, Special'noe izdanie, Novorossiysk, GMU imeni admirala F.F. Ushakova, 2003.

5. F.A. Vas'kevich, V.M. Gordynskij, Ocenka pogreshnosti regulirovki indikatornogo privoda glavnyh, Special'naya rabochaya kniga «Usovershenstvovanie sudovyh energeticheskikh ustanovok i sistem », Moskva, Mortechnikinformreklama, 1991.
6. Kondrat'ev S.I. Maksimizatsiya nadezhnosti processov v usloviyah mezhсистемных vzaimodejstvij s ne vpolne opredelennymi parametrami [Tekst] / S.I. Kondrat'ev, A.P. Lickevich V sbornike: Strategiya razvitiya transportno-logisticheskoy sistemy Azovo-CHernomorskogo bassejna. Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tekhnicheskoy i kommercheskoy ekspluatatsii morskogo transporta Materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy i 6-j regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Otvetstvennye za vypusk: akademik RAT, d.t.n., prof. V.V. Dem'yanov, akademik RAT, d.e.n., prof. V.E. Deruzhinskij. 2007. S. 204-207.
7. Karakaev A.B., Hekert E.V., Lukanin A.V. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnyh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovyh elektroenergeticheskikh sistem (CHast' 2) / Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 4 (81). S. 85-95.
8. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovyh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst] / A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 2 (83). S. 114-122.
9. Panamarev V., Hekert E.V. Raschet koncentracii okislov azota dlya kotel'noj ustanovki Aalborg Missionol s topochnym ustrojstvom kbsd-1900 i sravnenie s eksperimental'nymi dannymi / Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2015. № 3 (76). S. 75-79.

УДК 624.074

DOI: 10.34046/aumsuomt94/17

МЕТОД РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В.Н. Агеев, доктор технических наук, профессор

Н.И. Овсянникова, кандидат физико-математических наук, доцент

В работе получены аналитические выражения прогибов закрепленной с двух концов упругой пластины под действием сжимающих усилий. Получены формулы для расчета деформации и показано, что максимальная величина стрелы поперечного прогиба зависит от величины сжимающего усилия и изгибной жесткости пластины. Приведен пример расчета максимального прогиба по полученной формуле на реальных данных и сделано сравнение с экспериментальными результатами, что дает возможность сделать вывод о высокой точности расчетов по полученной формуле при соблюдении допустимых значений параметров.

Ключевые слова: деформация пластины, сжимающие усилия, поперечный прогиб

Analytical expressions are obtained for the deflections of the elastic plate fixed at two ends under the action of compressive forces. Formulas for calculating the deformation are obtained and it is shown that the maximum value of the transverse deflection boom depends on the width, thickness and length of the plate, the amount of compressive force and the bending stiffness of the plate. An example of calculating the maximum deflection according to the obtained formula on real data is given and a comparison with experimental results is made, which makes it possible to conclude that the calculations using the obtained formula are highly accurate while observing the permissible values of the parameters.

Keywords: plate deformation, compressive forces, lateral deflection

Introduction

When designing engineering structures, they usually achieve three basic conditions: strength, rigidity and structural stability. It is known that elements such as cylindrical rods or thin plates can be deformed under the action of external forces and, at certain critical loads, their shape becomes unstable: cylindrical rods are bent, and the plates swell. Theoretical studies in this direction were carried out at the beginning of the last century, in particular, S.P. Timoshenko [1,2]. However, many questions related to obtaining calculation formulas that are in good agreement with experimental data remain open.

In this paper, we consider the problem of obtaining an analytical dependence of the deflection of a

plate fixed at two ends from its geometric and physical characteristics when it is compressed in the longitudinal direction.

Mathematic model

Consider a plate or a piece of flexible tape of length L_n , width b ($b < L_n$), and thickness δ , $\delta \ll b$. The compression of the segment in the longitudinal direction is performed by the force N distributed along the end face (Fig. 1). It is necessary to find the value of N , the arrow of the longitudinal deflection h_0 , the radius of curvature of the longitudinal deflection ρ_0 , at which the arrow of the transverse deflection Δh_0 has a maximum value.