

*Е. В. Климова*

**ОБРАЗОВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ  
В ВЫБРОСАХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ  
В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ**

*E. V. Klimova*

**FORMATION OF HARMFUL SUBSTANCES  
IN EMISSIONS OF SHIP DIESEL ENGINES  
DURING THE PROCESS OF AIR-FUEL MIXTURE BURNING**

Экологическая обстановка в морских и речных акваториях во многом зависит от выбросов токсичных компонентов судовых дизелей. Причина образования в отработавших газах вредных веществ – горение топлива. Эффективность процесса горения в цилиндрах дизелей во многом определяется организацией высокоэффективного рабочего процесса. Основные особенности процесса сгорания в дизелях связаны, во-первых, со способом смесеобразования при впрыске топлива в цилиндр в конце такта сжатия, причем частично впрыск продолжается и в течение периода сгорания, и, во-вторых, со значительно более высокими давлением и температурой сжатия. Уровень концентрации вредных веществ в отработавших газах судовых дизелей является следствием качества протекания физико-химических процессов при подготовке и сгорании топливовоздушной смеси. Для уменьшения неполноты сгорания и снижения концентрации токсичных компонентов в отработавших газах основное внимание необходимо уделять факторам, оказывающим непосредственное влияние на предпламенные процессы и процессы сгорания.

**Ключевые слова:** судовой дизель, отработавшие газы, смесеобразование, сгорание, топливовоздушная смесь.

Ecological conditions in sea and river water areas greatly depend on emissions of toxic components of ship diesel engines. The formation reason of harmful substances in exhaust gases is fuel burning. The efficiency of the burning process in cylinders of diesel engines is largely defined by the organization of a highly effective working process. Basic features of the combustion process in diesel engines are firstly connected with a way of mixture formation at fuel injection into the cylinder in the end of a compression step, and partially injection proceeds during the combustion period, and, secondly, with a much higher pressure and compression temperature. The level of concentration of harmful substances in exhaust gases of ship diesel engines is a consequence of the behavior quality of physical and chemical processes at preparation and combustion of the air-fuel mixture. It is necessary to pay a great attention to the factors, making direct impact on pre-flaming processes and combustion processes, in order to reduce combustion incompleteness and decrease in the concentration of toxic components in exhaust gases.

**Key words:** ship diesel engine; exhaust gases, mixture formation, combustion, air-fuel mixture.

Протяженность внутренних водных судоходных путей России составляет в настоящее время более 100 тыс. км. В эксплуатации находится 36,2 тыс. самоходных и несамоходных судов, принадлежащих различным акционерным обществам, судоходным компаниям, частным владельцам, государственным предприятиям и организациям.

Экологическая обстановка в морских и речных акваториях во многом зависит от количества выбросов токсичных компонентов судовых главных силовых установок и вспомогательных дизель-генераторов. Судовой дизель, вырабатывая механическую энергию за счет окисления топлива воздухом, в процессе работы осуществляет непрерывный теплообмен с окружающей атмосферой. Он вбирает воздух и потребляет топливо, затем выбрасывает отработавшие газы, состоящие из части воздуха и продуктов окисления топлива. Таким образом, воздух, поступающий в цилиндр дизеля, совершает определенный термодинамический цикл, претерпевая при этом химические изменения, в результате чего превращается в сложную газовую смесь с множеством компонентов. Четыре компонента:  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  и  $H_2O$  составляют свыше 99,0–99,9 % объема газа, остальные 0,1–1,0 % объема составляют примеси, угрожающие окружающей среде [1]. Применительно к судовым дизелям принято считать, что около 98 % отработавших газов, являющихся неотъемлемой частью их разомкнутого цикла, состоит из веществ в газообразном состоянии, включающих в свой состав окиси углерода  $CO$ , азота  $NO_x$ , серы  $SO_x$  и углеводородов

$C_xH_y$  [2]. Кроме того, с отработавшими газами в атмосферу выбрасываются вредные вещества в твердом и жидком состоянии. Твердая фаза представлена в основном продуктами неполного сгорания топлива в виде сажи. В состав жидкой фазы входят мелкодисперсные сферические частички смазочных веществ и не полностью окислившегося топлива.

Причина образования в отработавших газах вредных веществ – горение топлива. Характерной особенностью дизеля является периодичное горение предварительно неперемешанных топлива и окислителя. Указанное обстоятельство обуславливает наличие гомофазного и диффузионного типов горения: первый определяется сгоранием топливовоздушной смеси, образовавшейся за период задержки воспламенения, второй – сгоранием остального количества топлива в диффузионном фронте пламени.

Необходимым условием совершенного протекания реакции горения в дизеле является тщательное предварительное смешивание топлива с воздухом. Наилучшее смешение обеспечивается, когда топливо находится в газообразном или парообразном состоянии. Для получения качественной смеси из жидкого топлива необходимо осуществить его предварительное распыливание и испарение. Распыленные частицы топлива находятся в среде горячего воздуха, быстро нагреваются и испаряются. Пары топлива, возникающие при испарении частиц, диффундируют в окружающее пространство, в результате чего образуется горючая смесь.

Первичные очаги пламени в камере сгорания дизеля появляются одновременно в нескольких точках, т. е. воспламенение топлива в дизеле является многоочаговым. Первичные очаги вызывают нагрев близлежащих участков смеси и общее повышение температуры в цилиндре, что ускоряет испарение остальных частиц топлива и протекание предпламенных реакций в образующейся горючей смеси. Большая скорость сгорания топлива в первый период, обусловленная многоочаговым воспламенением, – характерная особенность рабочего цикла дизеля. В дальнейшем часть топлива, поступающего в среду горящего факела, воспламеняется практически мгновенно. Однако условия горения этого топлива менее благоприятны, в процессе сгорания происходит постепенное загрязнение среды образующимися инертными газами. Скорость сгорания при этом зависит от интенсивности подачи топлива в цилиндр и условий поступления кислорода в зону горения. Последняя часть подаваемого топлива обычно сгорает на линии расширения в условиях недостатка кислорода.

Процесс образования вредных веществ протекает в камере сгорания и в потоке отработавших газов (последнее – в ходе охлаждения газов как за счет естественной теплоотдачи, так и перемешивания с атмосферным воздухом). Данное обстоятельство сказывается, в частности, на распаде  $C_xH_y$  на легкие и тяжелые (конденсируемые при температуре окружающей среды) углеводороды и образовании сернистых соединений, что необходимо учитывать при оценке эмиссии вредных веществ.

Эффективность процесса горения в цилиндрах дизелей во многом определяется организацией высокоэффективного рабочего процесса. Наиболее узким местом в теории и практике организации рабочего процесса остаются вопросы смесеобразования, включающие в себя формирование и развитие топливного факела, его взаимодействие с воздушным зарядом и со стенкой камеры сгорания, нагрев и испарение капель топлива, смешение паров топлива с воздухом, прогрев смеси до температуры самовоспламенения.

Впрыснутое топливо в виде струи, состоящей из значительного количества капель диаметром от 1 до 100 мкм, распределенных в объеме струи, распространяется по камере сгорания от сопла распылителя [1]. Скорость распространения топлива монотонно уменьшается, при ее начальном значении на срезе сопла 250–280 м/с. Пространство между каплями заполнено воздухом и парами топлива, которые составляют 90–95 % объема струи [3]. Воспламенение топлива происходит в средней части оболочки струи, где в первую очередь достигается благоприятное соотношение между топливом и воздухом. От очага воспламенения горение распространяется по наружной оболочке струи по направлению к вершине, как бы догоняя ее. В момент охвата горением всей наружной оболочки топливной струи заканчивается быстрое (кинетическое) сгорание и происходит спад в скорости выделения тепла. Время охвата пламенем всей наружной оболочки топливной струи не превышает 35–40 % от продолжительности топливоподачи и 20 % – от продолжительности всего процесса сгорания.

Токсичные вещества, содержащиеся в отработавших газах, в зависимости от механизма их образования можно разделить на группы [4, 5]:

- углеродосодержащие вещества – продукты полного и неполного сгорания топлив (углекислый газ, окислы углеводорода, углеводороды, в том числе полициклические ароматические (ПАУ), сажа);

- вещества, механизм образования которых непосредственно не связан с процессом сгорания топлива (оксиды азота – по термическому механизму);

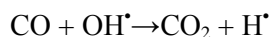
- вещества, выброс которых связан с примесями, содержащимися в топливе (соединения свинца, серы, других тяжелых металлов), воздухе (кварцевая пыль, аэрозоли), а также образующимися в процессе износа деталей (оксиды металлов).

Рассмотрим подробнее механизмы образования веществ, содержание которых в отработавших газах дизелей нормируется или предполагается нормировать в будущем.

*Моноксид углерода* CO – образуется в ходе предпламенных реакций, при сгорании углеводородного топлива с некоторым недостатком воздуха, а также при диссоциации CO<sub>2</sub> (при температуре более 2 000 К). Образование CO является одним из принципиально возможных направлений реакций в механизме горения (окисления) углеводородов, которое можно представить в виде



*Диоксид углерода* CO<sub>2</sub> – нетоксичное, но вредное вещество в связи с фиксируемым повышением его концентрации в атмосфере планеты и его влиянием на изменение климата. Основная доля образовавшихся в камере сгорания CO окисляется до CO<sub>2</sub>, не выходя за пределы камеры сгорания. Наибольший вклад в образование CO<sub>2</sub> вносит необратимая реакция

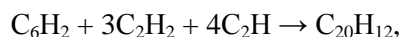


Окисление угарного газа CO в углекислый газ CO<sub>2</sub> происходит в выпускной трубе. Величина выбросов CO<sub>2</sub> зависит от физико-химических и теплофизических свойств топлив и их расхода.

*Углеводороды* C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> – несколько десятков веществ, образующихся в результате:

- реакций цепочно-теплого взрыва – пиролиза и синтеза (ПАУ, альдегиды, фенолы);
- неполноты сгорания в результате нарушения процесса горения (из-за прекращения реакций окисления углеводородов при низких значениях температуры, неоднородности топливо-воздушной смеси, пропусков зажигания в отдельных циклах или цилиндрах двигателя (негоревшие компоненты топлива и масла).

Наиболее токсичны из углеводородов ПАУ. Максимальный уровень токсичности (агрессивность × концентрация) имеет бенз(α)пирен C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>. Гипотетическая реакция образования C<sub>20</sub>H<sub>12</sub> при пиролизе углеводородных топлив при температуре более 873 К может быть записана в виде [6]:



где C<sub>6</sub>H<sub>2</sub> – полирадикал, представляющий собой зародыш сажи; C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H – элементные строительные блоки.

В состав твердых частиц входят нерастворимые (твердый углерод, оксиды металлов, диоксид кремния, сульфаты, нитраты, асфальты, соединения свинца) и растворимые в органических растворителях (смолы, фенолы, альдегиды, лак, нагар, тяжелые фракции, содержащиеся в топливе и масле) вещества. Твердые частицы в отработавших газах дизелей с наддувом состоят на 68–75 % из нерастворимых веществ, на 25–32 % – из растворимых [7].

*Сажа* (твердый углерод) С является основным компонентом нерастворимых твердых частиц. Образуется при объемном пиролизе (термическом разложении углеводородов в газовой или паровой фазе при недостатке кислорода). Образование сажи протекает в несколько стадий [8]:

- образование зародышей;
- рост зародышей до первичных частиц шестиугольных пластинок графита;
- увеличение размеров частиц до сложных образований – конгломератов, включающих 100–150 атомов углерода;
- выгорание.

Важный процесс, определяющий уровень эмиссии сажи при горении, – ее выгорание в высокотемпературном газовом потоке при температуре 850–920 К. В процессе выгорания значимыми являются диффузия и сорбция на поверхности конгломератов сажи твердых иглообразных образований ПАУ, что позволяет отнести ее к классу опасных загрязнителей [6].

*Сера S*, содержащаяся в моторном топливе, во время горения интенсивно окисляется в диоксид серы  $SO_2$  по механизму, сходному с механизмом образования CO. Диоксид серы  $SO_2$  может окисляться (с существенно меньшей скоростью) до сернистого ангидрида  $SO_3$  по уравнению



Далее происходит реакция  $SO_3$  с парами воды, приводящая к образованию серной кислоты  $H_2SO_4$ . Реакция протекает на стенках камеры сгорания при температуре ниже 815 К [9].

*Оксиды азота*  $NO_x$  представляют собой набор следующих соединений:  $N_2O$ , NO,  $N_2O_3$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_4$  и  $N_2O_5$ . Преобладает NO – 90 % всех выбросов дизельного двигателя. Условия образования оксидов при горении до сих пор не исследованы в достаточной мере и требуют глубокой проработки весьма сложной химической кинетики процесса в сочетании с детальным изучением теплообмена и его влияния на кинетику. В 1960–1970-е гг. в большинстве публикаций в качестве основной модели образования NO принималась «термическая» схема [9, 10]. Согласно этой схеме, выход NO определяется реакцией между атомом кислорода и молекулой азота. При этом количество атомарного кислорода определяется диссоциацией молекулы  $O_2$ . Эти процессы имеют очень большой энергетический барьер  $E = 561 \text{ кДж/моль}$  и, следовательно, определяются температурой процесса. Однако исследования, проведенные в течение последних 20 лет, показали следующее [3, 7, 11]:

- образование NO в пламени имеет место не после окончания реакции горения, а непосредственно в зоне горения и зависит от ряда других химических реакций в пламени. При этом собственно образование NO происходит не только в результате реакции атомарного кислорода с молекулой азота, но и в результате ряда других реакций;

- образование кислорода в пламени происходит не только за счёт диссоциации  $O_2$ , но и в ходе ряда других реакций; концентрация атомарного кислорода в зоне горения на 1–2 порядка выше равновесной, определяемой из условий диссоциации молекулярного кислорода, и в пламени углеводородов составляет 0,4–0,8 %;

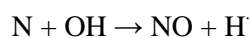
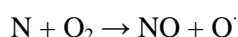
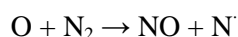
- максимальная температура в ядре зоны горения существенно ниже расчётной теоретической вследствие наличия сверхравновесных концентраций промежуточных продуктов реакций и теплообменных процессов;

- зависимость выхода NO от температуры значительно слабее, чем это предполагалось ранее.

В настоящее время приближенно, до детальной разработки процесса, можно отметить три основные группы источников образования оксида азота при горении. В камере сгорания окислы азота NO могут образовываться:

- 1) при высокотемпературном окислении азота воздуха (термический NO);
- 2) в результате низкотемпературного окисления азотсодержащих соединений топлива (топливный NO);
- 3) из-за столкновения углеводородных радикалов с молекулами азота в зоне реакций горения при наличии пульсаций температуры (быстрый NO).

В камере сгорания доминирует термический NO, образующийся из молекулярного азота во время горения бедной топливовоздушной смеси и смеси, близкой к стехиометрической, за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания. При сгорании бедных и умеренно богатых смесей ( $\alpha > 0,8$ ) реакции происходят по цепному механизму [10]:



В бедных смесях выход NO определяется максимальной температурой (2 800–2 900 К) цепочно-теплого взрыва, кинетикой образования. В богатых смесях выход NO перестает зависеть от максимальной температуры взрыва и определяется кинетикой разложения. При горе-

нии бедных смесей значительное влияние на образование NO оказывает неравномерность температурного поля в зоне продуктов сгорания и присутствие паров воды, которая в цепной реакции окисления  $N_2$  является ингибитором.

*Диоксид азота* ( $NO_2$ ) представляет собой красно-бурый газ с неприятным запахом, сильно действующий на слизистые оболочки. Он получается как промышленный продукт в процессе производства азотной кислоты.

*Монооксид азота* (NO) – бесцветный газ, на воздухе немедленно окисляющийся до  $NO_2$ .

В результате исследований [10, 12] были получены данные, позволившие выявить основные факторы, определяющие содержание  $NO_x$  в продуктах сгорания при импульсном горении предварительно перемешанных топлива и окислителя:

- увеличение доли топлива, сгорающего в диффузионном режиме, при постоянстве общего количества периодически подаваемого топлива, обуславливает увеличение поверхности фронта диффузионного горения  $F_d$ , а также концентрации сажи и, до определенного момента,  $NO_x$ ;

- увеличение количества сгорающего топлива при его непрерывной подаче приводит к увеличению поверхности  $F_d$ , а также концентрации сажи и, до определенного момента,  $NO_x$  в продуктах сгорания;

- с момента резкого роста содержания сажи в продуктах сгорания начинается процесс уменьшения концентрации  $NO_x$  в продуктах сгорания независимо от способа подачи топлива;

- выход  $NO_x$  пропорционален величине поверхности  $F_d$  до момента интенсификации процесса сажеобразования, при котором влияние поверхности компенсируется снижением температуры горения;

- подвижность реакции образования NO при диффузионном горении высокая, что позволяет в расчетах учитывать только реакцию разложения, считая скорость реакции образования NO бесконечно большой.

Таким образом, увеличение в отработавших газах дизеля концентрации как  $NO_x$ , так и сажи связано с увеличением площади поверхности диффузионного горения, определяемой увеличением цикловой подачи топлива (что можно косвенно оценить по коэффициенту избытка воздуха  $\alpha$ ), а также сокращением периода задержки воспламенения. Период задержки воспламенения представляет собой подготовительную фазу к процессу сгорания в цилиндре двигателя с воспламенением от сжатия и зависит от функции впрыска топлива, температуры начала впрыска, условий смешивания паров топлива с воздухом и качества топлива. Параметры впрыска, в свою очередь, определяются давлением впрыска топлива, степенью дробления топлива, длиной струи и скоростью полета топливной струи. В общей длительности периода задержки могут быть выделены: 1) физическая составляющая, зависящая в основном от параметров впрыска и условий смешения паров топлива с воздухом; 2) химическая составляющая, определяемая свойствами топлива.

Процессы воспламенения от сжатия жидких топлив, впрыскиваемых в нагретый воздух, сильно осложнены неоднородностью получающейся при этом горючей смеси. Однако доказано, что химические реакции, предшествующие воспламенению распыленных жидких топлив, не отличаются существенно от реакций, развивающихся в однородных смесях, и сам процесс воспламенения всегда происходит в газовой фазе [3]. Воспламенение распыленного жидкого топлива произойдет только после того, когда топливо, хотя бы частично, испарится, и его пары будут перемешаны с воздухом, причем образующаяся смесь будет состоять из чистых паров топлива, а на внешних границах факела – из чистого воздуха. Этим объясняется наличие некоторого периода задержки воспламенения, обычно оцениваемого как интервал времени от начала подачи топлива до начала заметного повышения давления в результате сгорания. Образующаяся смесь неоднородна по температуре, т. к. теплота, расходуемая на испарение топлива и дальнейшее нагревание его паров, заимствуется из окружающего нагретого воздуха.

Основные особенности процесса сгорания в дизелях связаны, во-первых, со способом смесеобразования при впрыске топлива в цилиндр в конце такта сжатия, причем частично впрыск продолжается и в течение периода сгорания, и, во-вторых, со значительно более высокими давлением и температурой сжатия.

Процесс сгорания можно разделить на следующие три фазы, не считая подготовительной:

- первая фаза – фаза начального или быстрого горения, в течение которой сгорает в основном топливо, впрыснутое в цилиндр в течение периода задержки воспламенения;

– вторая фаза – фаза основного горения, в течение которой скорость тепловыделения примерно пропорциональна скорости поступления топлива;

– третья фаза – фаза диффузионного догорания.

Необходимо подчеркнуть, что характер и скорость тепловыделения в каждой из этих фаз могут существенно изменяться в зависимости от конструктивных особенностей камеры сгорания, особенностей процесса смесеобразования и характера движения воздушного заряда.

Особенности горения в дизеле связаны с периодичной подачей в камеру сгорания предварительно перемешанных топлива и окислителя, что предопределяет наличие двух типов горения – быстрого (взрывного) и диффузионного. Характеристики первого типа горения обуславливаются процессом распространения пламени по предварительно подготовленной за период задержки воспламенения топливовоздушной смеси, кинетикой (аналогично горению в двигателе внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием). Характеристики второго типа горения определяются макрокинетическими процессами, связанными с неоднородностями концентраций реагентов и температуры в зоне реакции и вызванными этим процессами тепло- и массопереноса (диффузией). При этом диффузионный фронт пламени стабилизируется на изостехиометрической поверхности (где  $\alpha = 1$ ), поскольку в данном случае скорость химических реакций наибольшая [7]. При отклонении от этой поверхности один из реагентов (топливо или окислитель) становится недостающим, что приводит к уменьшению скорости реакций. В связи с вышесказанным выделяют две фазы горения в дизеле: фазы нестационарного формирования диффузионного фронта пламени и фазы квазистационарного диффузионного горения. Таким образом, характерной особенностью горения топлива в дизеле является наличие диффузионного режима в течение всего процесса горения. В этом основное отличие от горения гомофазных смесей, у которых можно отметить наличие только процесса распространения пламени (в чистом виде или одновременно с объемным воспламенением).

Уровень концентрации вредных веществ в отработавших газах судовых дизелей является следствием качества протекания физико-химических процессов при подготовке и сгорании топливовоздушной смеси. Однако в настоящее время не все особенности протекания данных процессов подробно изучены. В связи с этим для уменьшения неполноты сгорания и снижения концентраций токсичных компонентов в отработавших газах основное внимание необходимо уделять факторам, оказывающим непосредственное влияние на предпламенные процессы и процессы сгорания: состояние топливной аппаратуры, распылителей форсунки, качество смесеобразования и протекания рабочего процесса, положение угла опережения впрыска топлива, значение цикловой подачи топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кульчицкий А. Р.* Исследование процессов образования и разработка методов снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей внедорожных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Владимир, 2006. – 35 с.
2. *Лоскутов А. С.* Исследование механизмов образования топливных окислов азота и сажи в цилиндре дизеля: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1982. – 298 с.
3. *Гаврилов Б. Г.* Химизм предпламенных процессов в двигателях / Ленинград. гос. ун-т им. А. А. Жданова. – Л., 1970. – 181 с.
4. *Климова Е. В.* Оценка концентрации токсичных составляющих в отработавших газах судовых дизелей и влияния конструкций камер сгорания на их количество // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2009. – № 2. – С. 162–166.
5. *Климова Е. В.* Методы дескриптивной статистики в анализе токсичных составляющих отработавших газов судовых дизелей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2010. – № 2. – С. 88–96.
6. *Батурин С. А.* Физические основы и математическое моделирование процессов результирующего сажевыделения и теплового излучения в дизелях: дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1982. – 441 с.
7. *Толиин В. И., Якунчиков В. В.* Режимы работы и токсичные выбросы отработавших газов судовых дизелей. – М.: Изд-во МГАВТ, 1999. – 192 с.
8. *Епифанов П. А., Карпова И. Е., Патраков Ю. М.* Содержание сажи в отработавших газах энергетических установок и способы его контроля и снижения // Судостроение. – 2006. – № 3. – С. 38–39.
9. *Раевски П.* Снижение уровня эмиссии оксидов серы на судах морского флота // Двигателестроение. – 2007. – № 1. – С. 43–45.

10. Панчишный В. И. Нейтрализация оксидов азота в отработавших газах дизелей // Двигателестроение. – 2005. – № 2. – С. 35–42.

11. Kazuhiko Nadase, Kohji Funatsu. Behavior of Band Spektra in Diesel Combustion Flames // OR of RTRJ. – 2006. – Vol. 29, N 2. – 88 p.

12. Бережной А. Г., Воропанова Л. А. Термодинамический анализ реакций образования оксидов азота окислением углекислым газом – продуктом полного сгорания углеродосодержащего топлива // Горизонты образования. – 2005. – № 7. – С. 26–30.

Статья поступила в редакцию 12.05.2011

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Климова Екатерина Владимировна** – Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; старший преподаватель кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»; тел.: 8 (8512) 614-166.

**Klimova Ekaterina Vladimirovna** – Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Science; Senior Teacher of the Department "Shipbuilding and Energetic Complexes of Sea Technological Equipment"; tel. 8 (8512) 614-166.