УДК 621.438 : 66.045.53 **doi: 10.32620/aktt.2018.5.04**

Р. М. РАДЧЕНКО[1], Б. С. ПОРТНОЙ[1], С. А. КАНТОР[2], В. С. ТКАЧЕНКО[2], А. А. ЗУБАРЄВ[1]

[1] ***Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна***
[2] ***ПАТ "Завод "Екватор", Україна***

ОТРИМАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ КОНДЕНСАТУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ ТА ПРОБЛЕМА СЕПАРАЦІЇ КРАПЕЛЬНОЇ ВОЛОГИ З АЕРОЗОЛЬНОЇ СУМІШІ В ГРАДИРНЯХ

Проаналізовані процеси тепловологісної обробки (охолодження з осушенням) повітря у двоступеневому повітроохолоджувачі на вході газотурбінної установки із застосуванням тепловикористовуючої холодильної машини комбінованого типу, яка складається з абсорбційної бромистолітієвої холодильної машини високотемпературного охолодження повітря до температури близько 15 °С та хладонової ежекторної холодильної машини низькотемпературного охолодження повітря до температури 10 °С і нижче, котрі трансформують теплоту відпрацьованих газів газотурбінної установки в холод з отриманням у повітроохолоджувачах конденсату як супутнього продукту охолодження повітря. Аналіз проведено для кліматичних умов півдня України. Відведення теплоти від конденсаторів та абсорбера тепловикористовуючих холодильних машин здійснюється відкритими градирнями мокрого типу. Виходячи з розподілення теплового навантаження на ступені двоступеневого повітроохолоджувача і теплових коефіцієнтів тепловикористовуючих холодильних машин, визначено проектне навантаження на градирні та їхню кількість. За результатами моделювання роботи системи охолодження повітря на вході газотурбінної установки отримані дані з поточної та загальної кількості конденсату, що випадає в повітроохолоджувачах у процесі конденсації водяної пари, яка завжди міститься у вологому повітрі, а також дані з кількості води, необхідної для підживлення градирень відкритого типу. При цьому розглядали лише втрати води, зумовлені лише механічним виносом (без врахування її випаровування в градирнях), що гостро ставить проблему сепарації крапельної вологи з аерозольної суміші. В результаті порівняння кількості води, необхідної для підживлення градирень, з одного боку, і кількості конденсату, отриманого в процесі охолодження повітря на вході газотурбінної установки, з іншого боку, показана можливість часткового забезпечення необхідних потреб води для підживлення градирень. Запропонована принципова схема двоступеневого охолодження повітря на вході газотурбінної установки в абсорбційній бромистолітієвій і хладоновій ежекторній холодильних машинах з градирнями мокрого типу для відведення теплоти від тепловикористовуючих холодильних машин і отриманням конденсату як супутнього продукту охолодження повітря та його застосуванням для підживлення градирень.

Ключові слова*: охолодження; газотурбінна установка; градирня; повітроохолоджувач; холодильна машина.*

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Для охолодження повітря на вході газотурбінних установок (ГТУ) у більшості випадків застосовують абсорбційні бромистолітієві холодильні машини (АБХМ), які трансформують в холод теплоту відпрацьованих газів з високою ефективністю: їх тепловий коефіцієнт $\zeta_A = 0{,}7…0{,}8$ [1]. Однак глибина охолодження повітря в АБХМ обмежена температурою $t_{п2} \approx 15$ ºС. В хладонових ежекторних холодильних машинах (ЕХМ) можливе більш глибоке охолодження повітря до температури $t_{п2} = 10$ ºС і нижче, проте їх ефективність значно менше: $\zeta_E = 0{,}2…0{,}3$ [2]. Отже, доцільним є двоступеневе охолодження повітря на вході ГТУ: у високотемпературному ступені повітроохолоджувача $ПО_{ВТ}$ до $t_{п2} = 15…20$ ºС за допомогою АБХМ, а до $t_{п2} = 7…10$ ºС в низькотемпературному ступені $ПО_{НТ}$ при використанні ЕХМ. Відведення теплоти від АБХМ і ЕХМ у довкілля здійснюється системою оборотного охолодження з градирнями відкритого типу, отже і втратами води внаслідок її випаровування у повітряному потоці (зі зниженням температури повітря практично до температури мокрого термометра $t_м$) та механічного винесення крапельної вологи. Однак питання використання конденсату водяної пари, який отримують у процесі охоло-

© Р. М. Радченко, Б. С. Портной, С. А. Кантор, В. С. Ткаченко, А. А. Зубарєв

дження повітря як супутній продукт, для підживлення градирень зазвичай не розглядається. Потреба в підживленні градирень залежить від їх теплового навантаження, яке в свою чергу – від теплового навантаження повітроохолоджувачів (ПО) на вході ГТУ, що змінюється відповідно до поточних температури $t_{зп}$ і відносної вологості $\varphi_{зп}$ зовнішнього повітря на вході ПО. Раціональне проектне питоме (віднесене до одиничної витрати повітря $G_п = 1$ кг/с) теплове навантаження двоступеневого повітроохолоджувача, визначене за методом, наведеним в [3], становить $q_0 = 34$ кВт/(кг/с) і розподілене між ступенями ПО як $q_{0.ВТ} = 24$ кВт/(кг/с) – на $ПО_{ВТ}$ та $q_{0.НТ} = 10$ кВт/(кг/с) – на $ПО_{НТ}$.

Мета дослідження – аналіз можливості використання конденсату, як супутнього продукту охолодження повітря на вході ГТУ, для підживлення градирень, передусім через втрати води, зумовлені її механічним виносом, що гостро ставить проблему сепарації крапельної вологи з аерозольної суміші.

2. Результати дослідження

Схема двоступеневого охолодження повітря на вході ГТУ в АБХМ і ЕХМ з використанням градирень мокрого типу для відведення теплоти від ТХМ показана на рис. 1.

Розрахунок параметрів процесу охолодження повітря на вході проведено для ГТУ UGT 10000 виробництва ДП НВКГ "Зоря"-"Машпроект" (потужність $N_e = 10$ МВт). Загальне проектне теплове навантаження на $ПО_{ВТ}$ визначають як $Q_{0.ВТ} = q_{0.ВТ} \cdot G_п = 24 \cdot 40 = 960$ кВт, виходячи з прийнятого питомого (при витраті повітря $G_п = 1$ кг/с) теплового навантаження $ПО_{ВТ}$ $q_{0.ВТ} = 24$ кВт(кг/с); $G_п = 40$ кг/с – витрата повітря. Проектне теплове навантаження на $ПО_{НТ}$ визначають аналогічно: $Q_{0.НТ} = q_{0.НТ} \cdot G_п = 10 \cdot 40 = 400$ кВт, де $q_{0.НТ} = 10$ кВт(кг/с) – питоме теплове навантаження $ПО_{НТ}$, прийняте виходячи з досягнення максимального темпу нарощування річного виробництва холоду [3]. Проектне навантаження на градирні мокрого типу, розраховане як

$$Q_{гр} = (Q_{0.ВТ} / \zeta_A + Q_{0.ВТ}) + (Q_{0.НТ} / \zeta_E + Q_{0.НТ}),$$

становить приблизно 4000 кВт і було розподілене на дві градирні потужністю по 2000 кВт, що давало змогу регулювання потужності градирень відповідно до поточних теплових навантажень.

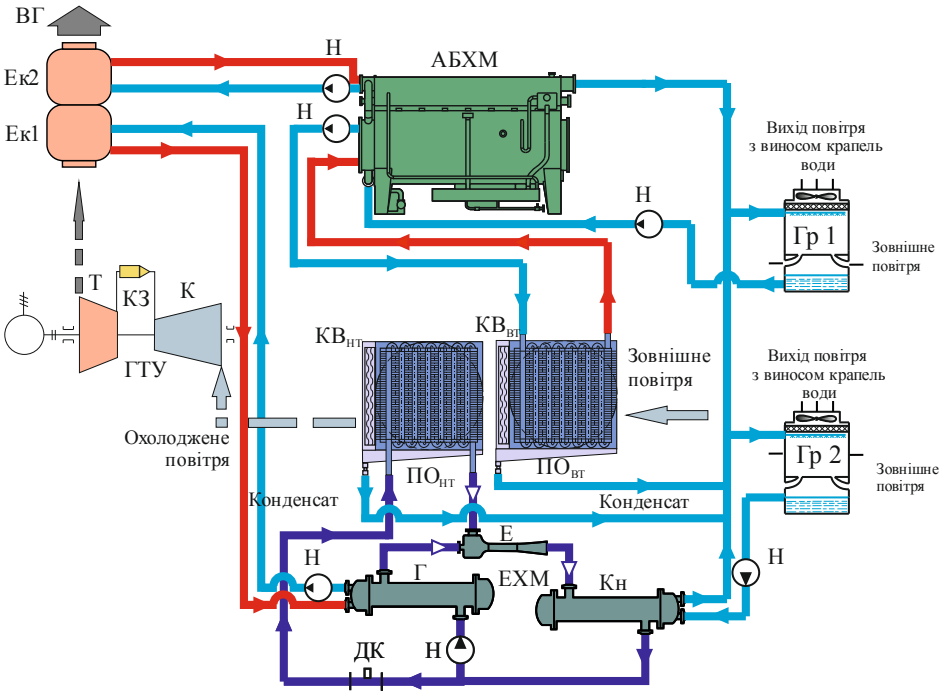

Рис. 1. Принципова схема двоступеневого охолодження повітря на вході ГТУ в АБХМ та ЕХМ з використанням градирень мокрого типу для відведення теплоти від ТХМ: К – компресор; Т – турбіна; КЗ – камера згоряння; Н – насос; ВГ – відпрацьовані гази; Ек – економайзер нагріву води для АБХМ і ЕХМ; $ПО_{ВТ}$ і $ПО_{НТ}$ – високотемпературний і низькотемпературний ПО; КВ$_{ВТ}$ и КВ$_{НТ}$ – краплевідокремлювачі конденсату високо- та низькотемпературного ступенів ПО; Гр – градирня; Е – ежектор; Г – генератор пари хладону; Кн – конденсатор ЕХМ; ДК – дросельний клапан

Результати розрахунку поточних параметрів роботи системи двоступеневого охолодження повітря на вході ГТУ в АБХМ і ЕХМ до температури $t_{п2} = 7…10$ ºС з відведенням теплоти від ТХМ градирнями мокрого типу наведено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, поточна витрата води градирнями $G_{гр}$ (через механічний винос крапельної вологи з градирень без врахування власне випаровування) значно перевищує поточну кількість отриманого конденсату $G_{кт}$, відведеного у двоступеневому повітроохолоджувачі на вході ГТУ, що свідчить про наявність дефіциту води для підживлення градирень ΔG. Це підтверджують також результати порівняння кількості отриманого конденсату та необхідного для підживлення, наведені на рис. 3.

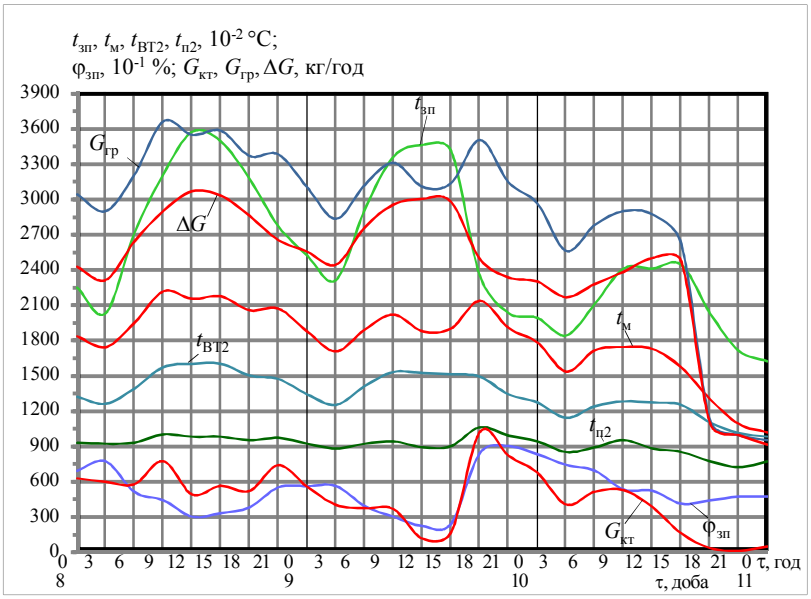

Рис. 2. Поточні значення температури $t_{зп}$ і відносної вологості $\varphi_{зп}$ навколишнього повітря, температури повітря $t_{ВТ2}$ на виході з $ПО_{ВТ}$, температури повітря $t_{п2}$ на виході з $ПО_{НТ}$, температури навколишнього повітря $t_м$ за мокрим термометром, поточна кількість отриманого конденсату при роботі обох ступенів ПО $G_{кт}$, поточна витрата води градирнями, що утворюється через винос парів води з градирень $G_{гр}$, поточна різниця між необхідним підживленням градирень та отриманим конденсатом ΔG упродовж 3 діб (8…10.07.2015), м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.

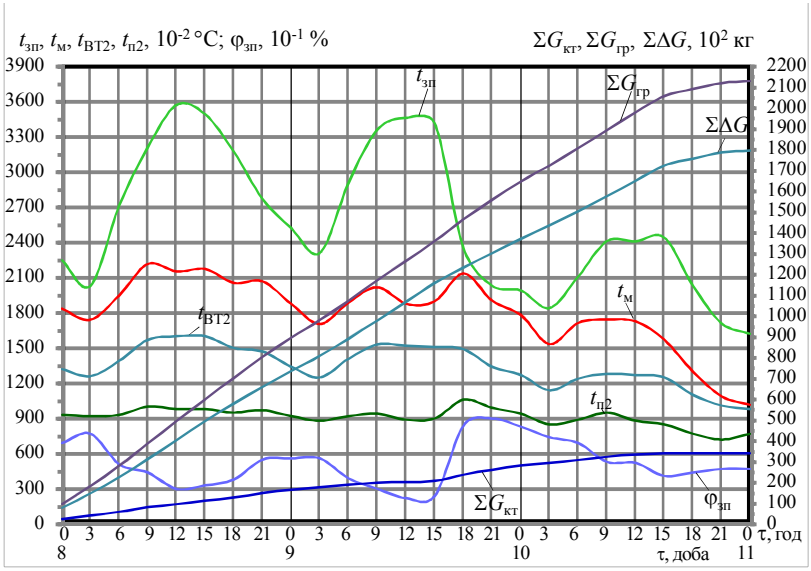

Рис. 3. Поточні значення температури $t_{зп}$ і відносної вологості $\varphi_{зп}$ зовнішнього повітря, температури повітря $t_{ВТ2}$ на виході з $ПО_{ВТ}$, температури повітря $t_{п2}$ на виході з $ПО_{НТ}$, температури навколишнього повітря $t_м$ за мокрим термометром, сумарна кількість отриманого конденсату при роботі обох ступенів ПО $G_{кт}$, сумарна втрата води через винос крапельної вологи з градирень $G_{гр}$, сумарна різниця між необхідним підживленням градирень та отриманим конденсатом ΔG упродовж 3 діб (8…10.07.2015), м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.

Як видно з рис. 3, за поточний період 8…10.07.2015 конденсат, який отримують в результаті роботи двоступеневого повітроохолоджувача на вході ГТУ, може забезпечити приблизно 15 % або 30 т його потреби для підживлення водою градирень, втрати якої зумовлені механічним виносом (без врахування власне випаровування води).

Висновки

Показано можливість використання конденсату, отриманого як супутній продукт при охолодженні повітря на вході газотурбінної установки (ГТУ), для часткового покриття потреб води для підживлення градирень мокрого типу, обумовлених її механічним виносом (без врахування власне випаровування води), що ставить гостро проблему сепарації крапельної вологи з аерозольної суміші.

Література

1. Popli S. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry [Text]/ Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Eveloy // Applied Thermal Engineering. – 2013. – №50. – P. 918–931.

2. Радченко, А.Н. Метод выбора рациональной тепловой нагрузки абсорбционно-эжекторного термотрансформатора охлаждения воздуха на входе регенеративных ГТУ компрессорных станций [Текст] / А.Н. Радченко, С.А. Кантор //Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 5(122). – С. 61–64.

3. Радченко, М. І. Метод визначення теплового навантаження системи кондиціювання повітря за максимальним темпом приросщення холодопродуктивності (на прикладі кондиціювання повітря енергетичного призначення) [Текст] / М. І. Радченко, Є. І. Трушляков, С. А. Кантор, Б. С. Портной, А. А. Зубарєв // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 4(148). – С. 44 – 48.

References

1. Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Eveloy Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry. *Applied Thermal Engineering*, 2013, no. 50, pp. 918–931.

2. Radchenko, A.N., Kantor, S.A. Metod vybora racionalnoy teplovoy nagruzky absorbcionno-ezhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya vozdukha na vhode regenerativnyh GTU kompressornyh stanciy [The method of evaluation of rational heat load on absorption-ejector thermotransformer for cooling regenerative GTU intake air of compressor stations]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 61–64.

3. Radchenko M. I., Trushliakov E. I., Kantor, S. A., Portnoi B. S., Zubarev A. A. Metod vyznachennya teplovoho navantazhennya systemy kondytsiyuvannya povitrya za maksymal'nym tempom pryroshchennya kholodoproduktyvnosti (na prykladi kondytsiyuvannya povitrya enerhetychnoho pryznachennya) [Method of determination of thermal load air conditioning systems by maximum cold performance rate (on the example of air conditioning for energy purposes)]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology,* 2018, no. 4 (148), pp. 44 – 48.

Поступила в редакцию 12.09.2018, рассмотрена на редколлегии 3.10.2018

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНДЕНСАТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ И ПРОБЛЕМА СЕПАРАЦИИ КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ ИЗ АЭРОЗОЛЬНОЙ СМЕСИ В ГРАДИРНЯХ

Р. Н. Радченко, Б. С. Портной, С. А. Кантор, В. С. Ткаченко, А. А. Зубарев

Проанализированы процессы тепловлажностной обработки (охлаждение с осушением) воздуха в двухступенчатом воздухоохладителе на входе газотурбинной установки с применением теплоиспользующей холодильной машины комбинированного типа, которая состоит из абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины высокотемпературного охлаждения воздуха до температуры примерно 15 °С и хладоновой эжекторной холодильной машины низкотемпературного охлаждения воздуха до температуры 10 °С и ниже, которые трансформируют теплоту отработавших газов газотурбинной установки в холод с получением в воздухоохладителях конденсата в качестве сопутствующего продукта охлаждения воздуха. Анализ проведен для климатических условий юга Украины. Отвод теплоты от конденсаторов и абсорбера теплоиспользующих холодильных машин осуществляется открытыми градирнями мокрого типа. Исходя из распределения тепловой нагрузки на ступени двухступенчатого воздухоохладителя и тепловых коэффициентов теплоиспользующих холодильных машин, определена проектная нагрузка на градирни и выбрано их количество. По результатам моделирования работы системы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки получены данные текущего и общего количества конденсата, который выпадает в воздухоохладителях в процессе конденсации водяного пара, который всегда содержится во влажном воздухе, а также данные количества воды, необходимой для подпитки градирен открытого типа. При этом рассматривали лишь потери воды, обусловленные механическим выносом (без учёта её испарения в градирнях), что остро ставит проблему сепарации капельной влаги из аэрозольной смеси. В результате сравнения количества воды, необходимой

для подпитки градирен, с одной стороны, и количества конденсата, полученного в процессе охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки, с другой стороны, показана возможность частичного обеспечения необходимых потребностей воды для подпитки градирен. Предложена принципиальная схема двухступенчатого охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки в абсорбционной бромистолитиевой и хладоновой эжекторной холодильных машинах с градирнями мокрого типа, для отвода теплоты от теплоиспользующих холодильных машин, получением конденсата как сопутствующего продукта охлаждения воздуха, и его применением для подпитки градирен.

Ключевые слова: охлаждение; газотурбинная установка; градирня; воздухоохладитель; холодильная машина.

OBTAINING AND APPLYING OF CONDENSATE IN AIR COOLING AT THE INLET OF ENERGY UNIT AND THE PROBLEM OF DROP MOISTURE SEPARATION FROM AEROSOL MIXTURE IN COOLING TOWERS

R. N. Radchenko, B. S. Portnoi, S. A. Kantor, V. S. Tkachenko, A. A. Zubarev

The processes of heat-humidity treatment (cooling with dehumidification) of air in a two-stage air cooling system at the inlet of a gas turbine unit applying a combined type heat-energized refrigeration mechanism, which consists of an absorption lithium-bromide high-temperature refrigeration mechanism to approximately 15 °C and a refrigerant ejector low-temperature refrigeration mechanism to 10 °C and below, which transform the heat of exhaust gases from gas turbine unit to the cold with the production of condensate in air cooling system as a by-product of air cooling has been analyzed. The analysis was carried out for the climatic conditions of the south of Ukraine. The heat removal from the condensers and the absorber of the heat-energized refrigeration mechanism are carried out with open wet cooling towers. Based on the distribution of the heat load on the steps of the two-stage air cooling system and the heat coefficients of the heat-energized refrigeration mechanisms, the project load on the cooling towers was determined and their number was selected. Based on the results of modeling of the operation of the air cooling system at the inlet of the gas turbine unit, were obtained data from the current and total amount of condensate that falls in the air cooling system during the condensation of water vapor, which is always contained in moist air, as well as the amount of water needed to feed an open cooling tower. In this case, only water losses due to mechanical removal (without taking into account its evaporation in cooling towers) were considered, which poses the problem of separation of droplet moisture from the aerosol mixture. As a result of comparing the amount of water needed to feed the cooling towers, on the one hand, and the amount of condensate obtained in the process of air cooling at the inlet of the gas turbine unit, on the other hand, was demonstrated that it is possible to partially satisfy the necessary water needs for cooling towers. A scheme of two-stage air cooling system at the inlet of a gas turbine unit with absorption lithium-bromide and refrigerant ejector refrigeration mechanism and wet cooling towers is proposed, to discharge heat from heat-energized refrigeration mechanisms, to produce condensate as a by-product of air cooling, and apply it to feed cooling towers.

Keywords: cooling; gas turbine unit; cooling tower; air cooler; refrigeration mechanism.

Радченко Роман Миколайович – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: nirad50@gmail.com.

Портной Богдан Сергійович – аспірант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail:

Кантор Сергій Анатолійович – канд. техн. наук, ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна, e-mail: s_kantor@mail.ru.

Ткаченко Веніамін Сергійович – інженер, ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна, e-mail: btd@zavod-ekvator.com.

Зубарєв Анатолій Анатолійович – ст. викладач Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: nirad50@gmail.com.

Radchenko Roman Nikolaevich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

Portnoi Bohdan Sergeevich – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail:

Kantor SergeyAnatolievich – Candidate of Technical Science, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: s_kantor@mail.ru.

Tkachenko Veniamin Sergeevich – Engineer, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: btd@zavod-ekvator.com.

Zubarev Anatolii Anatoliyovych – senior lecturer of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.