

УДК 628.11

## СНИЖЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Федоровская Н.К.**

*Севастопольский Государственный Университет  
г. Севастополь, 299053, ул. Университетская, 33  
E-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru*

***Аннотация.** Исследован механизм воздействия на биоресурсы морей водопотребляющих систем охлаждения энергоустановок судов и морских платформ различного назначения. Определено, что при этом наиболее сильно страдает планктон, являющийся основой пищевой цепочки в морях и океанах. Показано, что применение фильтрующего оборудования является малоэффективным. Решение проблемы может быть достигнуто за счет использования замкнутых систем охлаждения, исключающих потребление воды.*

***Abstract.** The mechanism of the impact on biological resources of the seas and inland bodies of water-cooling systems of power plants, a wide range of objects have been studied ships, offshore platforms and thermal power plants. It is shown that in this case plankton is greatly affected, which is the basis of the food chain in the pond. It is proposed to use a closed cooling system, eliminating the consumption of water.*

***Ключевые слова:** биоресурсы морей, планктон, энергоустановки, система охлаждения, устройства теплоотвода*

***Key words:** the biological resources of the seas, plankton, plants, cooling systems, heat exchangers*

---

**Введение.** Моря и океаны являются местом сосредоточения значительных биоресурсов, в частности рыбных. При этом основой формирующейся пищевой цепочки является фито- и зоопланктон. В мировом океане суммарная биомасса фитопланктона оценивается в 1,5 млрд т, а зоопланктона - 20 млрд. т. Однако, по данным [1], из-за быстрого размножения продукция фитопланктона за год может достигать 550 млрд. т, что почти в 10 раз больше суммарной продукции всего животного населения океана. Фитопланктон - пища мелких планктонных животных, которыми питаются более крупные.

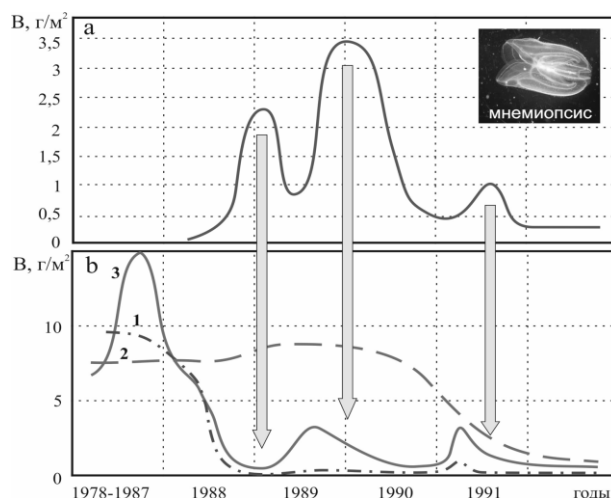
Перемещения планктонных организмов происходят не только пассивно, с помощью течений воды, но и благодаря собственному активному движению. Планктонные организмы перемещаются то вверх (к поверхности), то вниз (на глубину) в течение суток. Это явление получило название суточных вертикальных миграций. В верхних слоях моря днем, особенно летом, планктона содержится сравнительно мало. Постепенно, с уменьшением яркости солнечного освещения, количество планктона в верхних слоях увеличивается, так как почти все планктонные организмы поднимаются к поверхности. Наблюдается и сезонная миграция планктона.

Обычно наибольшее количество планктона наблюдается преимущественно в верхних слоях моря на глубинах до 50м, например, исследования [2] показали, что глубина, на которой в Черном море происходит наиболее интенсивный фотосинтез массовых видов одноклеточных водорослей планктона, составляет 10...15м. Количество планктона возрастает в прибрежной зоне. В теплое время года масса зоопланктона в одном кубическом метре воды достигает сотен граммов.

Роль планктона чрезвычайно важна в плане сохранения и преумножения рыбных ресурсов. К сожалению, забор воды для обеспечения работы систем охлаждения энергоустано-

вок морских объектов осуществляется именно с глубин максимального сосредоточения планктона, икринок и рыбной молоди.

**Постановка задачи.** Количество планктона решающим образом определяет рыбную продуктивность морей. В этой связи весьма показательной является ситуация, сложившаяся на Черном море в конце 1980-х - начале 90-х гг. В этот период с балластными водами судов в Черное море попал гребневик мнемииопсис (*Mnemiopsis leigyi*), который обычно обитает у побережья Северной Америки. Этот организм характеризуется огромным репродуктивным потенциалом и производит ежедневно до 10000 яиц. При благоприятных условиях общая масса мнемииопсиса может удваиваться за двое-трое суток. Данный организм питается планктоном, икринками и личинками рыб. В результате попадания мнемииопсиса в Черное и Азовское моря произошло резкое сокращение количества планктона (рис. 1) и численности рыб. Так, по данным [3] вылов ставриды сократился со 110...115 тыс. т до 3 тыс. т. В Азовском море запасы тюльки сократились в 400 раз. В конце 1990-х гг. в Черном море распространился гребневик берое (*Beroe ovata*), для которого мнемииопсис является хорошим кормом, вследствие чего численность последнего существенно снизилась. Как следствие, рыбная продуктивность Черного и Азовского морей стала восстанавливаться.



**Рис. 1.** Изменение биомассы мнемииопсиса (а) и планктона (б) по годам [3]:  
1 – саггиты; 2 – веслоногий рачок; 3 – мелкие рачки и личинки донных животных

К сожалению, наблюдается выраженная общая тенденция снижения биоресурсов морей и океанов, что определяется негативным воздействием разнообразных промышленных объектов, в том числе многочисленных судов и морских платформ.

Наибольшее количество планктона (55...90%) сосредоточено в поверхностном слое до глубин порядка 50 м. Именно с этих глубин (обычно до 10...20 м) забирается вода, предназначенная для работы системы охлаждения энергетических установок указанных объектов.

К сожалению, вопрос отрицательного экологического воздействия систем охлаждения энергоустановок не нашел до настоящего времени должного внимания в судостроении. Проблема весьма актуальна и для разнообразных технических средств освоения месторождений морского шельфа, у которых потребление морской воды часто достигает значительных величин. Так, например, на морской платформе ЛСП-1 номинальное потребление морской воды составляет 1600 м<sup>3</sup>/час, а максимальное может достигать 2000...2400 м<sup>3</sup>/час.

При этом следует обратить внимание на тот факт, что специалисты, занимающиеся системами охлаждения прибрежных тепловых электростанций, изучают и учитывают эту проблему. Неспособность планктона и рыбной молоди сопротивляться силе всасывания в систему приводит к их механическому повреждению и гибели. В [4] установлено, что вследствие

механического воздействия погибает 70...90% зоопланктона, а в некоторых случаях наблюдалась даже 100%-я смертность.

Рассмотрим механизм воздействия на биоресурсы морей широко используемых в настоящее время разомкнутых систем охлаждения судовых энергетических установок. Вода из окружающей акватории всасывается и прокачивается насосом через фильтр, теплообменники и арматуру, после чего сбрасывается обратно в акваторию. Используемые фильтры имеют размеры проходных отверстий от 1 до 4,5 мм. В [5] отмечается, что при размерах отверстий сетчатого фильтра менее 1 мм резко возрастает скорость его засорения, в том числе планктоном, что грозит нарушением работы системы охлаждения. Планктон имеет размеры, измеряемые микронами и более, а большинство икринок - размер 1...2 мм. Поэтому практически все они попадают в систему охлаждения и, пройдя перечисленные выше элементы системы, под воздействием теплового и механического факторов либо погибают, либо существенно повреждаются.

Сотрудниками ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского» РАН выполнены соответствующие оценки для морской буровой платформы проекта 10170 с суммарной мощностью энергоустановки 5000 кВт, потребляющей 400...800 м<sup>3</sup>/час охлаждающей морской воды. Определено, что в результате действия указанных выше факторов за год уничтожается примерно 200 т промысловых видов рыб. При этом учитывалась естественная гибель икринок и рыбной молоди.

Таким образом, системы охлаждения судов и разнообразных морских технических средств освоения морского шельфа наносят существенный экологический урон биологическим ресурсам морей и океанов. Аналогичная ситуация имеет место и для внутренних водоемов.

Для судов и морских платформ отсутствуют стандартные технические решения в направлении рыбозащитных устройств (РЗУ). Апробированные конструкции для береговых водозаборов во многих случаях неприемлемы. Существует много сложностей, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом, надежностью и т.д. Тем не менее, практические шаги в этом направлении делаются. Так, например, для морской буровой установки «Исполин» (рис. 2) были изготовлены пять РЗУ типа конусная сетка с рыбоотводом, которые устанавливаются перед всасывающими коллекторами насосных агрегатов. Конструкции данного типа предусматривают использование вращающихся и мелкоячеистых сетчатых частей. Вращающиеся части в морской агрессивной среде требуют смазки и ухода, а сетки — чистки от планктона, обрастания и мелкого твердого мусора.



*Рис. 2. Морская буровая установка «Исполин» и рыбозащитное устройство типа конусная сетка*

Для морской платформы ЛСП-1 (рис. 3) используются РЗУ жалюзийного типа с потокообразователем.



Рис. 3. Морская платформа ЛСП–Iи рыбозащитное устройство жалюзийного типа с потокообразователем

Тем не менее, проведенные исследования [6] показали, что сетчатые устройства оказываются эффективными (70% и более) лишь для рыб размером более 8...15 мм (рис. 4).

Как указывалось, выше, размер планктона измеряется микронами и более, а большинство икринок и рыбной молоди имеют размер около 1...2 мм. Из анализа рис. 4 следует, что данные рыбозащитные устройства не эффективны для указанных организмов.

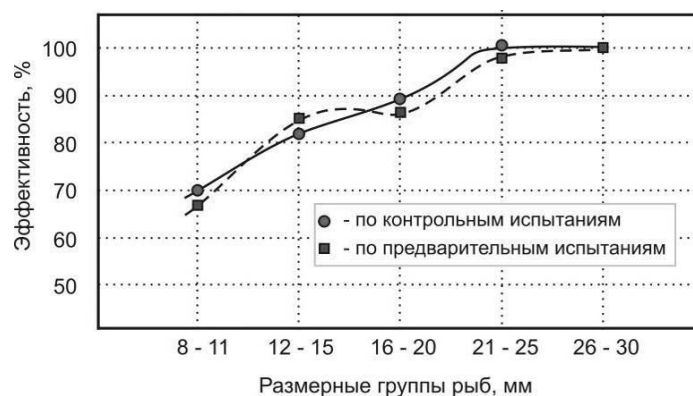
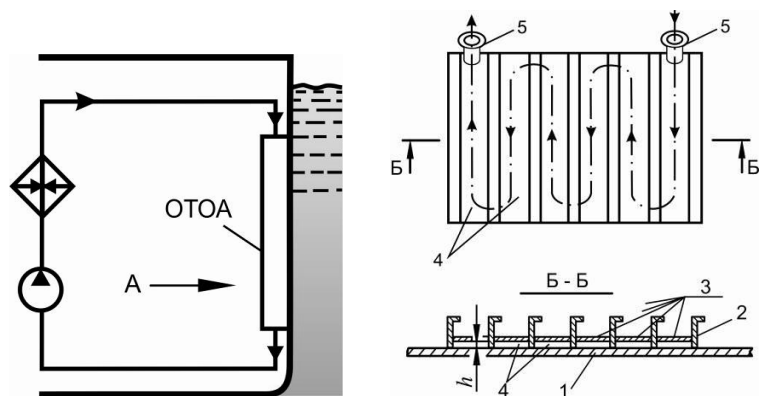


Рис. 4. Эффективность сетчатых рыбозащитных устройств [6]

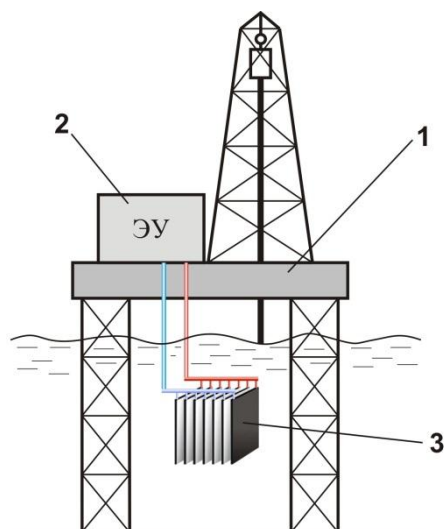
#### Анализ полученных результатов

Решение проблемы может быть найдено во внедрении замкнутых систем охлаждения энергоустановок [7], исключающих потребление морской воды. Для судов создание таких систем может быть выполнено с использованием обшивочных теплообменных аппаратов (ОТОА). Охлаждаемый теплоноситель отводит теплоту через обшивку корпуса судна в забортную воду (рис. 5). Более подробно такие конструкции описаны в [7, 8].

Для морских малоподвижных и стационарных объектов, например, для разнообразных морских платформ, могут быть применены погружные теплообменные аппараты (ПТОА) [7], которые размещаются в водоеме на некоторой глубине удаленно от энергетического объекта (рис. 6). Известно, что для морских условий на глубине около 50 метров температура воды независимо от сезона равна примерно 8°C. Размещение ПТОА на таких глубинах стабильно обеспечивает максимально возможные температурные напоры в аппарате, а, следовательно – его минимальные массогабаритные показатели.



**Рис. 5.** Замкнутая система охлаждения судовой энергоустановки  
 1 – судовая обшивка; 2 – элементы набора корпуса судна;  
 3 – дополнительные листы; 4 – лабиринтный канал;  
 5 – патрубки подвода и отвода теплоносителя



**Рис. 6.** Погружной теплообменный аппарат пластинчатого типа, вынесенный за пределы морской платформы. 1- морская платформа; 2- энергоустановка; 3 – ПТОА

При неподвижной воде водоема достигаемые значения коэффициента теплоотдачи решающим образом зависят от разности температур между наружной поверхностью стенки аппарата  $t_c$  и воды  $t_e$  в водоеме. Именно данный случай теплоотдачи при свободной конвекции считают основным расчетным режимом таких аппаратов и в целом ЗСО.

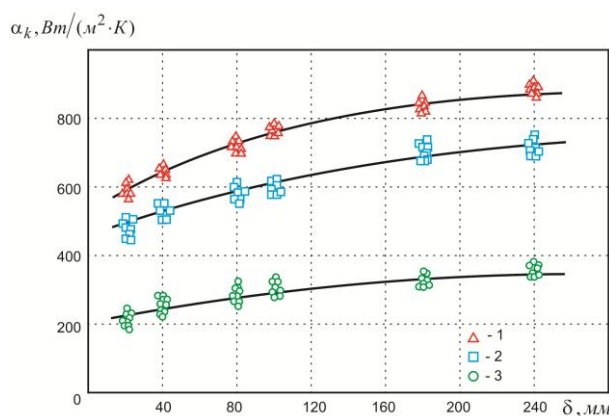
На базе лаборатории Эффективных энергетических технологий и установок Морского института Севастопольского государственного университета была специально создана экспериментальная установка [7], моделирующая ЗСО энергоустановки и перечисленные выше устройства теплоотвода.

В результате определены зависимости, отписывающие теплоотдачу забортной воде устройств пластинчатого типа, и разработаны соответствующие методики их теплотехнического расчета. В частности получена зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  от температурного напора  $(t_c - t_e)$  между наружной теплоотдающей поверхностью и забортной водой при различных скоростях воды  $v$  в лабиринтном канале аппарата. Определено, что снижение

температурного напора, например, за счет прогрева воды в водоеме в летний период, приводит существенному снижению эффективности теплоотдачи.

В принципе теплопередающие элементы ПТОА могут иметь различную форму, например, плоскую, трубчатую и др. Аппараты в виде набора плоских пластин просты в изготовлении, сравнительно легко очищаются от загрязнения и заменяются в случае необходимости. Пластины выполняются полыми и имеют внутренние перегородки, формирующие лабиринтный канал для прохода охлаждаемой пресной воды. Теплоотдача в данном канале осуществляется при вынужденной конвекции. Как отмечалось ранее, коэффициент теплопередачи, а, следовательно, и массогабаритные показатели ПТОА, решающим образом зависят от эффективности теплоотдачи наружной поверхности аппарата к заборной воде.

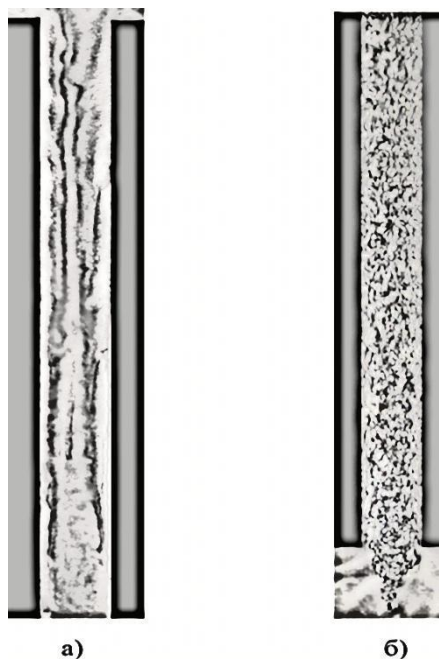
Исследования теплоотдачи ПТОА в условиях свободной конвекции показали, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  такого аппарата зависит не только от температурного напора ( $t_c - t_e$ ) между наружной поверхностью и водой, но и от зазора  $\delta$  между пластинами (рис. 7). Увеличение ( $t_c - t_e$ ) и  $\delta$  приводит к увеличению  $\alpha_k$ .



**Рис. 7.** Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  от зазора  $\delta$  при различных температурных напорах: 1 – при температурном напоре ( $t_c - t_e$ ) =  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Поскольку теплоотдача в неподвижную заборную воду осуществляется при свободной конвекции, то достигаемые при этом значения  $\alpha_k$  оказываются сравнительно небольшими, что приводит к значительным размерам ПТОА. Возможность внедрения рассматриваемых экологически безопасных систем охлаждения энергетических установок напрямую связана с поиском и разработкой эффективного метода снижения массогабаритных показателей ЗСО. При этом решающим является повышения эффективности теплоотдачи именно к заборной воде. Необходим достаточно простой, надежный и эффективный метод интенсификации теплоотдачи.

Были предприняты специальные визуальные исследования связанные, с поиском такого метода интенсификации теплоотвода. На рис. 8а показано течение воды в ПТОА пластинчатого типа при неподвижной заборной воде (теплоотдача при свободной конвекции). Как видно, интенсивность течения жидкости мала. Для интенсификации теплоотвода предложено в зазор между пластинами подавать воздух. Как видно из рис. 8б формируется двигающаяся в верх газожидкостная струя, течение жидкости становится более интенсивным и наблюдается существенная дополнительная турбулизация потока. В дополнении к этому всплывающие пузырьки воздуха за счет поперечных пульсаций разрушают пристенный пограничный слой, что способствует увеличению коэффициента теплоотдачи.



*Рис. 8. Визуализация течения воды в пластинчатых ПТООА при свободной конвекции (а) и в случае создания газожидкостной струи (б)*

Проведенные теплотехнические исследования показали, что при температурных напорах ( $t_c - t_b$ ) порядка  $10^0\text{C}$  и более теплоотдача увеличивается в 6...9 раз. При уменьшении температурного напора, что связано, например, с прогревом морской воды в летний период, эффективность метода существенно увеличивается. Так при температурных напорах всего 2...4 $^0\text{C}$  теплоотдача увеличивается в 20...30 раз. При этом подаваемое количество воздуха на один метр длины устройства теплоотвода в горизонтальном направлении составляло всего  $(0,14...1,15) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ .

**Выводы:** Решение проблемы снижения отрицательного антропогенного воздействия систем охлаждения морских энергоустановок связано с широким внедрением в практику замкнутых систем охлаждения. Имеются положительные примеры создания таких систем и их эксплуатации. Без использования специальных методов интенсификации теплоотвода эффективность систем относительно мала, что сдерживает их широкое внедрение в практику. Предложен простой и одновременно эффективный метод решения данного вопроса, связанный с применением газожидкостных струй. В результате удастся в несколько раз снизить массогабаритные характеристики устройств теплоотвода и в целом замкнутых систем охлаждения.

### Литература

1. Биологический энциклопедический словарь [Электронный ресурс] // URL: [http://dic-academic.ru/dic.nsf/dic\\_biology/4312/ПЛАНКТОН](http://dic-academic.ru/dic.nsf/dic_biology/4312/ПЛАНКТОН) (дата обращения: 19.05.2016).
2. Зайцев Ю.П. Жизнь морской поверхности [Электронный ресурс] // URL: [http://collectedpapers.com.ua/ru/hfs/ecology/life\\_of\\_the\\_sea\\_surface/ekologichni-piramidi-pri-poverxnevogo-biotopu](http://collectedpapers.com.ua/ru/hfs/ecology/life_of_the_sea_surface/ekologichni-piramidi-pri-poverxnevogo-biotopu) (дата обращения: 22.05.2016).
3. Краткая историческая экология: Регуляция численности популяций в биоценозах [Электронный ресурс] // URL: <http://helpiks.org/6-1866.html>
4. Звягинцев А.Ю. Морские техноэкосистемы энергетических станций [Текст] / А.Ю. Звягинцев, А.В. Мощенко. Владивосток: Дальнаука, 2010. 343 с.

**Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri №1, 2018**  
**Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy №1, 2018**

---

5. Гарбаненко О.К. Оснащение водозаборов морских нефгазодобывающих платформ рыбозащитными устройствами [Электронный ресурс] // Материалы конференции Нефть и газ арктического шельфа-2008. URL: <http://helion-ltd.ru/s-m-part-2/3713-2009-10-14-18-33-05/> (дата обращения: 23.07.2016)
6. Ващинников А.Е. Новые направления в разработке сетчатых рыбозащитных устройств [Текст] / А.Е. Ващинников, А.А. Васильев, К.В. Илюшин, В.Д. Шульгин // Материалы докладов 4-й Всерос. конф. с международным участием. Борок: Акварос, 2010. с. 9–13.
7. Федоровский К.Ю., Федоровская Н.К. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок. Москва.: ИНФРА-М, 2017. 163 с.
8. Федоровский К.Ю. Исследование теплопередачи в экологически безопасных системах охлаждения энергоустановок морских объектов / К.Ю.Федоровский, Н.К.Федоровская, В.А.Тимофеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 3-4. с.82-88.

*Tövsiyə edib: t.e.d., prof. Q.A.Əbdülrəhmanov*