УДК 621.187.32(088.8):541.123.38:621.182.44

Абрамов В.А.
ОНМА

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОЧИСТКИ СУДОВОГО ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Совершенствованию технологических процессов и, соответственно, улучшению использования топливно-энергетических ресурсов, в значительной мере способствует оптимизация работы судового теплообменного оборудования.

Теплообменные аппараты являются одним из самых распространённых и важных элементов судового теплоэнергетического оборудования и от качества и эффективности их работы зависит нормальная эксплуатация всей судовой энергетической установки (СЭУ) в целом.

Одним из основных факторов, снижающих эксплуатационную эффективность судовых телообменников, является кристаллизация накипных отложений на теплообменных поверхностях.

Материал, представленный в статье, посвящён проблеме усовершенствования методов борьбы с накипеобразованием в судовых теплообменных аппаратах и поиска альтернативных путей её решения, которые до сих пор актуальны.

В предыдущей работе автора [1] достаточно подробно проведены рассмотрение и анализ литературных и экспериментальных данных процессов накипеобразования в судовых теплообменниках, а также методов и средств их очистки от накипных отложений, используемых на судах морского флота.

Показано, что у большей части судовых теплообменников температура поверхности не превышает 70-80°С и. при отсутствии концентрирования раствора, основной фазой в накипи является карбонат кальция ($CaCO_3$).

Проведенный анализ известных методов и средств очистки от накипи показал, что все они, в той или иной степени, обладают недостатками и требуют, в лучшем случае, использования дефицитных химических препаратов.

Отмечено, что разработанный в ОНМА альтернативный углекислотный метод очистки от накипи и предотвращения её образования обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными мето-

дами очистки, но также не лишён недостатков, ограничивающих его широкое использование.

Для решения поставленной задачи по усовершенствованию углекислотного метода очистки от накипи, т.е. повышения его эффективности и экономичности, были проведены поисковые экспериментальные исследования по растворимости мелкокристаллического карбоната кальция ($CaCO_3$), как основного компонента накипных отложений, в растворах сульфаминовой кислоты малых концентраций при повышенных давлениях CO_2 в сосуде-реакторе, создаваемых баллонной двуокисью углерода.

Полученные результаты показали, что растворимость $CaCO_3$ в растворах сульфаминовой кислоты увеличивается с повышением давления CO_2, а наибольшая растворимость карбоната кальция наблюдается при поддержании давления CO_2 в сосуде-реакторе на уровне 0,2 МПа. Это указывает на перспективность метода очистки от накипи, основанного на этом принципе, и проведения более глубоких исследований с целью дальнейшего усовершенствования режимов очистки и последующего внедрения их в практику технической эксплуатации флота. Для этого необходимо решить следующие задачи, т.е. последовательно выполнить следующие этапы работы:

Обоснование выбора способа усовершенствования (интенсификации) режимов очистки теплообменников от накипи, его описание и проведение постановочного эксперимента по определению принципиальной работоспособности предложенных решений.

Испытания выбранного интенсифицированного способа (с использованием многофакторного планирования эксперимента) и разработка математической модели усовершенствованных режимов очистки теплообменников от накипи.

Разработка рекомендаций по практическому использованию на судах интенсифицированной очистки теплообменников от эксплуатационных отложений.

1.Обоснование выбора способа усовершенствования (интенсификации) режимов очистки теплообменников от накипи и проведение постановочного эксперимента

Для достижения этой цели предлагается использовать эффект выделения газов (в частности CO_2) из их пересыщенных растворов — эффект пневмошока. Выделение газов из их пересыщенных растворов — широко распространенное явление [2]. Так, при снижении

давления над природными газированными или искусственно полученными минеральными водами, немедленно начинается образование газовой фазы. Пересыщенный же раствор газа в жидкости может быть получен предварительным ее насыщением под давлением с последующим изменением параметров состояния газового раствора например, при резком сбросе давления.

Механизм рассматриваемого интенсифицированного способа очистки предполагается следующим.

Вначале производится насыщение жидкости, заключенной в теплообменнике, углекислым газом под максимально возможным давлением, что интенсифицирует процесс его растворения [3]. Т. е. таким газом, который растворяясь в жидкости вступает с ней в реакцию с одновременным образованием агрессивного к накипи соединения (угольной кислоты) и раствора с большим избыточным газосодержанием. При контакте накипи с раствором угольной кислоты происходит ее частичное растворение и зарождение в контактирующем слое накипи ряда поверхностных дефектов (поры, язвы и т.п.), нарушающих прочность накипных отложений. Происходит своеобразное травление поверхности накипи образовавшимся раствором кислоты. Под влиянием градиента концентраций и напора агрессивный и газонасыщенный раствор проникает через образовавшиеся поры под слой накипи к поверхности нагрева. В процессе контакта кислотного раствора с накипными отложениями происходит постепенное увеличение величины pH, свидетельствующее о протекании чисто химического процесса растворения накипи и, следовательно, зарождении ее пористой структуры. По истечении некоторого промежутка времени после начала контакта раствора с накипью между ними устанавливается равновесие, характеризующее потерю раствором его агрессивности (но не газонасыщенности), что можно определить по стабилизации величины pH на уровне равновесного значения, характерного для данных условий. Дальше держать теплообменник под повышенным давлением не имеет смысла.

Таким образом, стабилизация величины pH на равновесном уровне должна свидетельствовать о прекращении процесса химического растворения накипи и по ней определяется момент начала второго этапа очистки, заключающегося в резком сбросе давления в теплообменнике, путем сообщения внутренней полости теплообменника с зоной пониженного давления, например с атмосферой [3]. На этом этапе начинает действовать вторая составляющая раствора - его

избыточное газосодержание. Сброс давления вызывает немедленное пузырьковое газовыделение из раствора и, в первую очередь, в местах дефектов накипи и под ее слоем, т.е. там, куда проник газонасыщенный раствор. После образования в этих местах газовых зародышей происходит дальнейший рост пузырьков газовой фазы, так как давление газа в них выше, чем в окружающей жидкости. Пузырь расширяется и деформирует вокруг себя накипь. Высвобождающийся газ не может свободно улетучиваться из пор, ввиду их относительно сложной формы и малых размеров, он накапливается в них в виде пузырей, по мере выделения CO_2 из раствора, и, наконец, он прорывает себе путь, разрушая структуру накипи. Причем разрушение накипи происходит по плоскостям спайности кристаллов, т.е. в потенциально слабых местах. Здесь же зарождаются и начинают развиваться усталостные трещины, приводящие к дальнейшему разрушению накипи и ее отслаиванию от поверхности нагрева после такой обработки.

Пузырьковый механизм снятия пересыщения раствора определяет существенность признака его максимальной газонасыщенности, что является необходимым для достижения поставленной цели - повышения эффективности удаления накипных отложений. Это можно объяснить следующим образом.

При резком сбросе давления, в местах дефектов накипи и под ее слоем образуются газовые зародыши, из которых происходит рост пузырьков газовой фазы, Т.е. избыточные газовые молекулы, гидратированные в воде, объединяясь, образуют пузырьки, которые и выносят избыточный газ, снимая таким образом пересыщение раствора. В результате этого процесса создается перепад концентраций раствора от поверхности вглубь накипи. Под влиянием градиента концентраций снова происходит проникновение газонасыщенного раствора через поры под слой накипи и дальнейшее образование пузырьков в этих местах. Чем больше в растворе растворено молекул газа, тем больше необходимо газовых пузырьков для полной его эвакуации из пересыщенного раствора. А чем больше пузырьков образуется в порах накипи и под ее слоем (что энергетически более выгодно, чем в объеме жидкости), то тем выше эффективность разрушения накипи и ее отслаивания от поверхности нагрева. Следовательно, сброс давления, осуществляемый из раствора максимально насыщенного газом, приведет к большему разрушающему эффекту.

Для ускорения образования дефектов в слое накипи в качестве насыщаемой газом жидкости возможно использование слабых растворов кислот, например, сульфаминовой кислоты. Это интенсифицирует процесс предварительного травления накипи и приведет к появлению большего количества участков с пониженными механическими свойствами, что в итоге ускорит дальнейший процесс очистки.

Кроме того, очистку дополнительно можно интенсифицировать следующим образом. После резкого сброса давления возможно повторное его повышение путем отсечения теплообменника от зоны пониженного давления и быстрого его сообщения вновь с зоной повышенного давления (например с баллоном со сжатой CO_2), повторяя затем такие быстрые знакопеременные изменения давления многократно [4]. Повторное повышение давления, воздействуя на образующиеся пузырьки, начинает противодействовать их росту, вынуждая вновь растворяться содержащийся в пузырьках газ. Процесс, набирая скорость, идет в обратном направлении и, наконец, пузырьки схлопываются, что приводит к возникновению ударно-волновых воздействий микрообъемов моющей жидкости на накипные отложения. Процесс разрушения накипи в итоге прогрессирует, так как в области образования и последующего схлопывания газовых пузырьков возникают многократно повторяющиеся импульсы механического напряжения, приводящие к усталости и разрушение этих участков накипи.

Осуществление следующего этапа интенсифицированной очистки от накипи возможно для теплообменников кипящего типа, например для испарителей избыточного давления, вспомогательных к утилизационных котлов и т.п. Для этого моющий раствор перегревают при повышенном давлении относительно температуры насыщения, соответствующей атмосферному давлению, например через трубки теплообменника, покрытые снаружи накипью, подается греющий теплоноситель - пар. После достижения нужной температуры серия циклов по резкому снижению и повторному повышению давления в теплообменнике возобновляется (при осуществлении постоянного нагрева моющего раствора).

Это вызывает периодическое вскипание моющей жидкости (в первую очередь у поверхности нагрева) при снижении давления до уровня атмосферного давления и, соответственно, прекращение процесса кипения — при последующем повышении давления в теплооб-

меннике до первоначально установленного значения, но не выше значения рабочего давления в теплообменнике. Такая обработка приводит к еще большему разрушению накипи генерируемыми на поверхности нагрева паровыми пузырьками. Продолжительность такой обработки выбирают экспериментально для каждого конкретного случая.

Необходимо отметить, что эта фаза очистки от накипи, т.е. очистка благодаря взрывному вскипанию моющей жидкости, может быть эффективна лишь тогда, когда обеспечивается гарантированное проникновение агрессивной жидкости под слой накипи к поверхности нагрева теплообменника, где и происходит ее последующее вскипание при резком сбросе давления. А поэтому, обязательным условием применения этого способа очистки является предварительная обработка накипи в агрессивных к ней растворах, с целью получения в слое накипи поверхностных дефектов, через которые моющий раствор проникает к поверхности нагрева, т.е. под слой накипи.

Таким образом, совокупное и последовательное осуществление предлагаемых решений должно привести к более эффективному удалению накипи с поверхности теплообмена, т.е, интенсифицировать процесс счистки от накипи. Для этого предварительно необходимо решить ряд теоретических и практических задач, заключающихся, прежде всего, в определении принципиальной работоспособности предлагаемых способов очистки.

Для качественной и принципиальной оценки пользования предлагаемых решений, с целью интенсификации очистки от накипи, был проведен постановочный эксперимент на натуральном паровом змеевике (с наружным диаметром 19 мм, внутренним - 15 мм, при общей длине 600 мм), наружная поверхность которого была покрыта плотным слоем карбонатной накипи толщиной около 2,5-3,0 мм.

Змеевик монтировался в сосуд-реактор 13 экспериментальной установки (рис. 1) при помощи технологического фланца. К нему подключались подводящий и отводящий паровые трубопроводы. Затем в сосуд заливался 1%-ный раствор сульфаминовой кислоты и через редуктор 9 и клапан 8 в него подавался углекислый газ от баллона с CO_2 10. Давление в сосуде поднималось до 0,2 МПа и поддерживалось на постоянном уровне до стабилизации величины pH ($pH_{кон}$= 5,26-5,27) в течение 10 часов. Давление 0,2 МПа было выбрано исходя из результатов предыдущего эксперимента, так как, согласно полученным данным [1], при давлении CO_2 равным 0,2 МПа

растворимость $CaCO_3$ более высокая, чем при остальных значениях давлений CO_2 во всем диапазоне исследуемых концентраций растворов сульфаминовой кислоты. На этом этапе происходило частичное растворение накипи и зарождение ее пористой структуры.

Затем с помощью тумблера 6 подавалось электропитание на электромагнитный клапан 5, который открывался, производя резкий сброс давления из сосуда. По достижении давления в сосуде уровня давления окружающей среды, клапан 5 опять закрывался при помощи тумблера 6 и через клапан 8 снова подавалась CO_2 из баллона в сосуд до достижения давления 0,2 МПа. Такие знакопеременные изменения давления путём открытия и закрытия электромагнитного клапана 5 производили многократно, в течение 3-х часов. Эффект пневмошока дополнительно разрушал накипь и скалывал ее с поверхности нагрева.

После окончания этого этапа, в змеевик начинал постоянно подаваться пар от судового вспомогательного котла до достижения температуры раствора в сосуде около 110°С. В данном случае наблюдался перегрев жидкости относительно температуры насыщения, соответствующей атмосферному давлению. Затем серия циклов по резкому снижению и повторному повышению давления в сосуде возобновлялась (при постоянной подаче пара через змеевик), что вызывало вскипание жидкости (и в первую очередь у поверхности нагрева) при снижении давления до атмосферного и прекращение процесса кипения - при повышении давления в сосуде. Такая обработка змеевика приводила к еще большему разрушению накипи, генерируемыми на поверхности нагрева паровыми пузырьками. Процесс с фазой кипения продолжался около 2-х часов.

Затем раствор из сосуда был слит, змеевик вынут и визуально осмотрен. Как показал осмотр, змеевик очистился от накипи полностью - до металла. В слитом из сосуда раствора обнаружены чешуйки накипи толщиной от 0,1 до 0,5 мм. Это свидетельствует о том, что кроме чисто химического растворения накипи происходило ее механическое разрушение и последующее скалывание с поверхности змеевика, за счет процессов с фазами пневмошока и взрывного кипения.

Таким образом, постановочный эксперимент по принципиальной оценке работоспособности и эффективности совокупного и последовательного применения предложенных методов интенсификации очистки от накипи привел к положительному результату, что делает

перспективными дальнейшие исследования в этом направлении для разработки математической модели режимов очистки, а также конкретных рекомендаций по использованию интенсифицированных методов очистки судовых теплообменников от накипных отложений в практике технической эксплуатации флота.

2.Испытания выбранного интенсифицированного способа и разработка математической модели усовершенствованных режимов очистки теплообменников от накипи

Проведенные поисковые испытания по проверке принципиальной работоспособности предложенных способов интенсификации очистки теплообменников от накипи дали положительные результаты и, в то же время, указали на необходимость продолжения экспериментальных исследований по данной проблеме для четкого определения влияния каждого из выявленных факторов и их взаимодействий. Это позволит, используя результаты эксперимента, построить математическую модель интенсифицированного процесса очистки.

Было установлено, что выдержка накипи в растворах сульфаминовой кислоты (NH_2SO_3H) соответствующей концентрации при повышенных давлениях двуокиси углерода (CO_2) до стабилизации величины pH и следующие за этим резкие сбросы и повышения давления, увеличивают количество удаленной накипи по сравнению с ее растворимостью в обычных растворах сульфаминовой кислоты. Введение фазы кипения при резких сбросах давления (с предварительным перегревом жидкости при давлении выше атмосферного), также повышает эффективность очистки от накипи за счет дополнительного механического разрушения накипи, образующимися паровыми пузырями. Полученные ранее данные позволили конкретизировать методику дальнейших экспериментальных исследований с учетом количества и величины определяющих факторов.

К переменным факторам, на основании предыдущих исследований, проведенного анализа, теоретических представлений и имеющейся информации были отнесены:

- избыточное давление CO_2 – (МПа);
- концентрация сульфаминовой кислоты – P_{CO_2} Ск (%);
- температура моющего раствора — t (°C).

Величины избыточного давления CO_2, выбранные при проведении исследований (0...0,22 МПа), лимитированы результатами пре-

дыдущих экспериментов [1], показавших, что наибольшая растворимость карбоната кальция ($CaCO_3$) наблюдается в растворах сульфаминовой кислоты при избыточном давлении CO_2 в сосуде-реакторе около 0,2 МПа.

Диапазон изменения концентрации сульфаминовой кислоты (0...2,2 %) в эксперименте выбран, исходя из минимальной концентрации кислоты, используемой при эксплуатационных очистках теплообменников [5, 6].

Диапазон изменения температур моющего раствора (27... 112° С) был выбран в соответствии с реальными температурами (в районе нижнего предела), выбираемыми в процессе проведения эксплуатационных очисток и температурой, превышающей температуру насыщения при атмосферном давлении.

Исследования проводились с использованием многофакторного планирования эксперимента [7]. Предварительная информация позволила установить, что линейного приближения недостаточно для моделирования изучаемого процесса с требуемой точностью, поэтому была произведена достройка обычного линейного плана до плана второго порядка, т.е. учтено взаимодействие более высокого порядка.

Исходные данные, т.е. область определения и интервалы варьирования каждого фактора, координаты нулевой точки эксперимента и соответствующие им кодированные значения факторов представлены в таблице.

Таблица. Исходные данные многофакторного планирования эксперимента

Факторы	Уровни факторов					Интервал варьирования
	-1,215	-1	0	+ 1	+ 1,215	
$\tilde{X}_1$ (P_{CO_2}, *МПа*)	0	0,02	0,11	0,20	0,22	0,09
$\tilde{X}_2$ ($C_к$, %)	0	0,20	1,10	2,00	2,20	0.90
$\tilde{X}_3$ (t,°*C*)	27,5	35,0	70,0	105,0	112,5	35.0

Программа многофакторного эксперимента была записана в виде матрицы планирования (в статье не приводится), где строки соответствовали различным экспериментальным режимам, а столбцы —

значениям факторов. Общее количество режимов (N) определено соотношением

$$N = 2k + 1 + 2k = 15,$$

где k = 3 — число факторов.

Определение количества накипи, удаляемой с образцов опытных трубок предлагаемыми методами, проводили на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

Установка содержит металлический сосуд-реактор 13, в который вмонтирован испытуемый образец 12 — трубка, покрытая с наружной стороны плотным слоем карбонатной накипи. Для контроля давления и температуры моющего раствора сосуд дооборудован манометром 3 и термометром 1. Заливка моющего раствора в сосуд производится через его клапан 2, его слив или отбор проб на анализ — через клапан 15. Сброс давления в сосуде производится через электромагнитный клапан 5, снабженный сигнальной лампочкой 4. Работа электромагнитного клапана (его включение и выключение) управляется тумблером 6. Сосуд-реактор снабжен также предохранительным клапаном 7. Подвод CO_2 в сосуд осуществляется от баллона 10 через газовый редуктор 9 и клапан подачи CO_2 8. При необходимости моющий раствор подогревается до требуемой температуры паром, который пропускается через опытную трубку 12 от вспомогательного котла. Отработавший пар через конденсатор 14 удаляется в теплый ящик. Для ускорения подогрева моющего раствора используется электронагреватель 11.

При проведении экспериментальных режимов использовались отрезки трубок (длиной 0,2 м и наружным диаметром около 0,04 м). покрытых с наружной стороны плотным слоем натуральной накипи толщиной до 2,5 мм. Анализ фазового состава образцов накипи, проведенный методом порошковой рентгенографии, показал, что основной составляющей накипи, покрывающей опытные трубки, является карбонат кальция модификации арагонит ($CaCO_3$-A) с примесью кальцита ($CaCO_3$-K) и сульфата кальция ($CaSO_4$). Расшифрованная и идентифицированная дифрактограмма представлена на рис. 2, Выбор для экспериментов образцов трубок с накипью данного фазового состава объясняется тем, что согласно [8, 9] в воде, насыщенной CO_2, минимальной растворимостью среди накипи различного фазового состава обладает карбонатная накипь, характерная для большинства судовых теплообменных аппаратов.

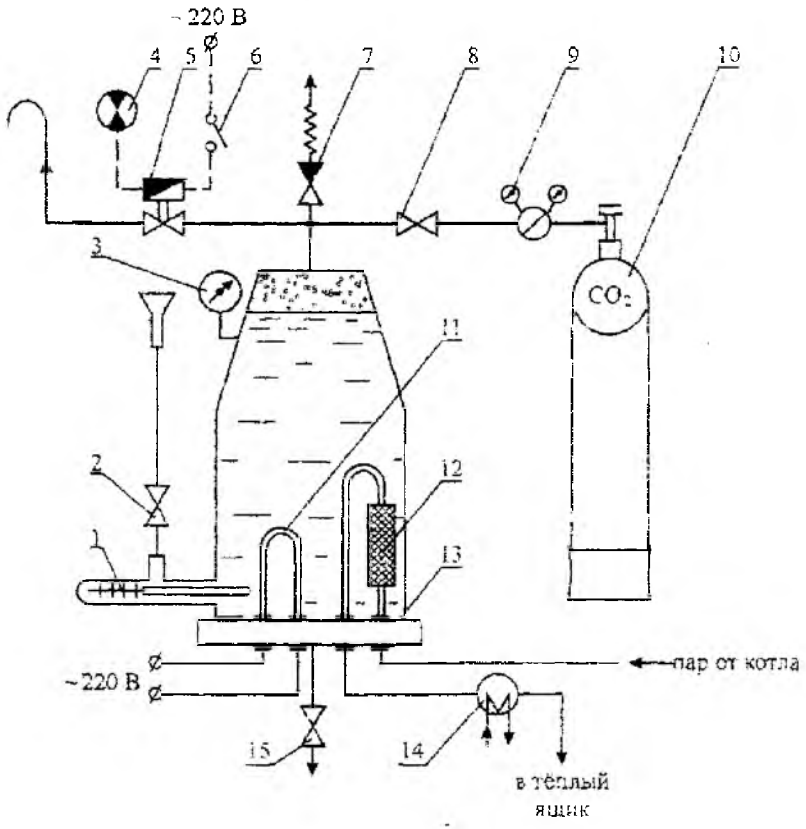

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — термометр; 2 — клапан для заливки моющего раствора; 3 — манометр; 4 — сигнальная лампочка; 5 — электромагнитный клапан сброса давления; 6 — тумблер подачи питания на электромагнитный клапан; 7 — предохранительный клапан; 8 — клапан подачи СО2 в сосуд-реактор; 9 — газовый редуктор; 10 — баллон с CO_2; 11 — электрический нагреватель; 12 — опытная трубка, покрытая накипью; 13 — сосуд-реактор; 14 — конденсатор отработавшего пара; 15 — клапан слива раствора из сосуда и отбора проб воды на анализ

Поэтому экспериментальные исследования с целью построения математической модели интенсифицированной очистки теплообменников от накипи, были направлены на отработку методов очистки от отложений, состоящих в основном из карбоната кальция.

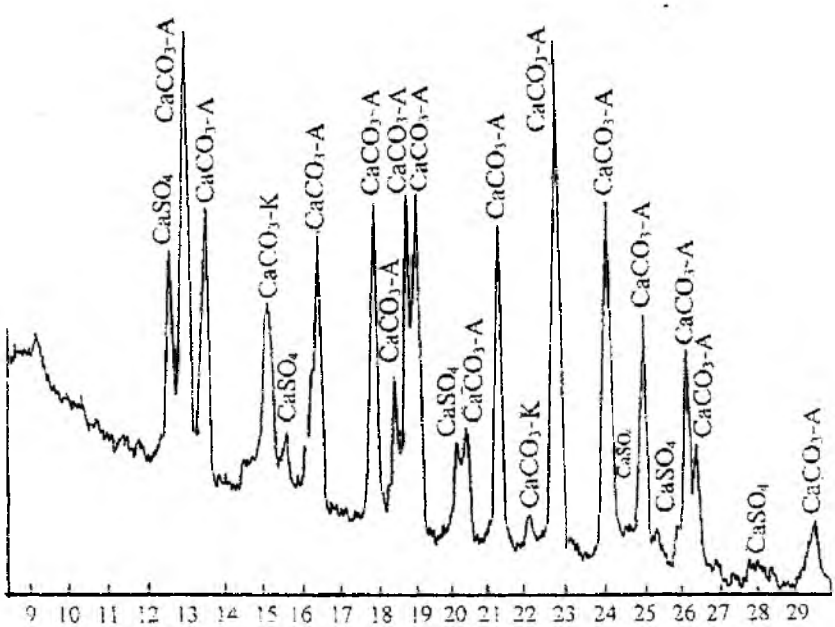

Рис.2. Дифрактограмма натуральной накипи с опытных трубок, используемых в эксперименте

Эксперимент проводился в следующем порядке.

Заготовленные образцы трубок с накипью перед началом каждого опыта высушивались, взвешивались, и определялось потенциальное количество накипи, покрывающей трубку. После монтажа опытного образца сосуд заполнялся моющим раствором с заданной концентрацией сульфаминовой кислоты. Затем, при необходимости, исходя из алгоритма разработанной программы, от газового баллона в сосуд подавалась CO_2, в результате чего в нем повышалось давление до требуемого уровня. После выдержки накипи в моющем растворе до момента стабилизации величины pH, что контролировалось с помощью универсального иономера ЭВ-74, путём открытия и закрытия электромагнитного клапана производили серию циклов «резкий сброс давления до атмосферного с последующим его повышением до первоначального уровня». В случае проведения эксперимента, в ходе которого присутствует фаза кипения раствора, паром, пропускаемым через трубку, раствор подогревали до температуры, превышающей температуру насыщения при атмосферном давлении. Поэтому при сбросе давления наблюдалось резкое вскипание раствора, что допол-

нительно интенсифицировало процесс разрушения и отслаивания накипи от стенок трубки под воздействием генерируемых над ней и в трещинах паровых пузырей. После окончания каждого из опытов, трубки высушивали при температуре не ниже 110° С и взвешивали. По разности веса трубки до и после эксперимента определяли количество удаленной накипи, приведенное к 1 л моющего раствора (S_{CaCO_3} , г/л).

Таким образом, было реализовано ортогональное центрально-композиционное планирование (ОЦКП) второго порядка. Экспериментальные результаты трех параллельных опытов при каждой строке матрицы планирования (в работе не приводится) усреднялись. После обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, состоящее из значимых эффектов

$$\hat{Y} = S_{CaCO_3} = 5{,}80622 + 1{,}56972X_1 + 5{,}15455X_2 + 0{,}81290X_3 + 0{,}57916X_1X_2 +$$
$$+0{,}18166X_1X_3 + 0{,}48749X_2X_3 + 0{,}27350X_1^2 + 0{,}54651X_2^2.$$

Факторы X_i в уравнении регрессии закодированы, и для перехода к натуральным значениям необходимо воспользоваться зависимостью

$$X_i = \frac{\left(\tilde{X}_i - \tilde{X}_i^0\right)}{\Delta\tilde{X}_i},$$

где X_i — кодированные безразмерные значения факторов (-1,215, -1, 0, +1, +1,215); $\tilde{X}_i$ — текущие значения факторов в натуральной размерности (P_{CO_2} - МПа, Ск - %, t - °С); $\tilde{X}_i^0$ - значения факторов в нулевой точке отсчета, центре эксперимента, т.е. на основном уровне; $\Delta\tilde{X}_i$ — интервалы варьирования i-того фактора в эксперименте, т.е. половина разности между верхним и нижним значениями факторов; $\hat{Y}$ — расчетное значение функции отклика, вычисленное по уравнению регрессии, т.е. — S_{CaCO_3} , г/л.

Поэтому

$$X_1 = \frac{\tilde{X}_1 - 0{,}11}{0{,}09}, где\ \tilde{X}_1 = P_{CO_2}\left(МПа\right);$$

$$X_2 = \frac{\tilde{X}_2 - 1{,}10}{0{,}90}, \quad \text{где} \quad \tilde{X}_2 = C_k \ (\%);$$

$$X_3 = \frac{\tilde{X}_3 - 70{,}0}{35{,}0}, \quad \text{где} \quad \tilde{X}_3 = t \ (^\circ C)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивали с помощью критерия Стьюдента. Адекватность уравнения проверяли критерием Фишера [7]. Результаты проверки показали, что с доверительной вероятностью 0,95 полученная модель адекватно описывает зависимость исследуемой величины (т.е. количество удаленной накипи — S_{CaCO_3}, г/л) от определяющих факторов в исследованном диапазоне их изменения. Хорошая адекватность построенной модели объясняется высоким уровнем априорной информации при выборе типа модели по результатам проведенных ранее поисковых исследований.

Анализ уравнения регрессии позволил оценить силу влияния, как отдельных факторов, так и их взаимодействий на количество удаленной с трубок накипи.

Влияние фактора X_2 (концентрации сульфаминовой кислоты - *Ск*, %) на величину выходного параметра (на количество удаленной накипи, приведенное к 1 л моющего раствора — S_{CaCO_3}, г/л) более существенно, чем факторов X_1 (избыточное давление CO_2 — Pco_2, МПа) и X_3 (температура моющего раствора – t,°C). Это объясняется преобладающим влиянием сильной кислоты на процесс химического растворения накипных отложений по сравнению со слабой угольной кислотой. Причём, при повышенных давлениях CO_2 это влияние более существенно, чем при отсутствии двуокиси углерода. В свою очередь, влияние Pco_2 на количество удаляемой в эксперименте накипи преобладает над влиянием температуры. Следует отметить, что введение в эксперимент фазы периодического вскипания моющего раствора оказывает влияние на выходной параметр только в случае предварительной обработки накипных отложений в агрессивных к ним растворах. Это приводит к своеобразному травлению накипи, приводящее к проникновению агрессивного и газонасыщенного раствора под ее слой и последующему разрушению накипи при его вскипании.

Анализ знаков и величин коэффициентов в уравнении регрессии также показывает, что значительное увеличение количества удаленной накипи происходит при одновременном увеличении значений всех факторов – X_1, X_2, X_3.

Для удобства практического использования при проведении эксплуатационных очисток, по уравнению регрессии построены основные графические зависимости количества удаленной накипи (S_{CaCO_3} , г/л) от концентрации сульфаминовой кислоты (Ск, %) для различных условий (в присутствии CO_2 и без нее, с вскипанием и без вскипания моющего раствора и т.п.), представленные на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что, например, при концентрации сульфаминовой кислоты равной 2 %, количество удаленной накипи, приведенное к 1 л моющего раствора при различных условиях, соответствует следующим значениям:

- при температуре 35° С и в присутствии только 2%-ной сульфаминовой кислоты — 8,5 г/л;

- с предварительным травлением накипи в 2%-ном растворе сульфаминовой кислоты и с последующими многократными вскипаниями раствора при сбросах давления до давления окружающей среды (температура раствора при этом составляет 105° С) — 10,8 г/л;

- в присутствии 2%-ной сульфаминовой кислоты и при избыточном давлении CO_2, равном 0,2 МПа, со сбросами давления до уровня окружающей среды и повторными повышениями давления до первоначального значения — 12,5 г/л;

- в присутствии 2%-ного раствора сульфаминовой кислоты, при Pco_2 =0,2 МПа и с фазами периодического вскипания перегретого моющего раствора при знакопеременных изменениях давления — 15,8 г/л.

Анализ этих данных говорит о том, что, например, введение только фазы вскипания агрессивного к накипи раствора приводит к увеличению количества удаленной накипи до 30%. Использование раствора сульфаминовой кислоты при повышенном давлении CO_2 (Pco_2 = 0,2 МПа) приводит к увеличению количества удаленной накипи до 47% (со сбросами и повышениями давления в сосуде-реакторе). И. наконец, одновременное действие всех трех определяющих факторов приводит к увеличению количества удаленной накипи до 85%, по сравнению со случаем использования обычного раствора 2%- ной сульфаминовой кислоты.

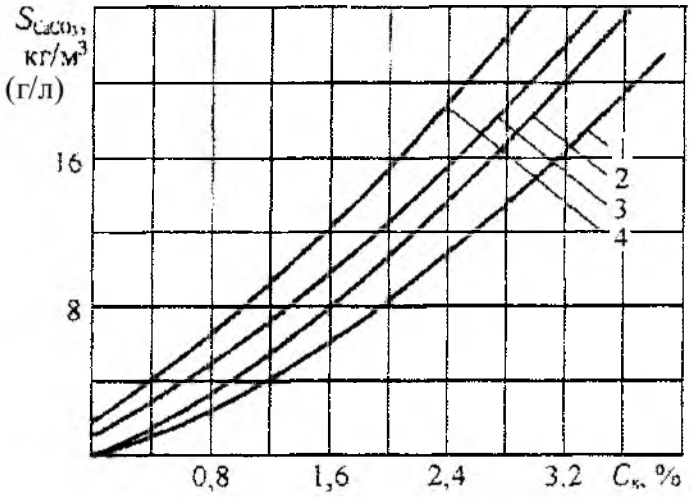

Рис. 3. Зависимость количества удалённой накипи от концентрации сульфаминовой кислоты при различных условиях многофакторного эксперимента: 1 – при 35°С с использованием одних растворов сульфаминовой кислоты; 2 – при 105°С (с фазой вскипания) растворов сульфаминовой кислоты; 3 – при 35°С с использованием растворов сульфаминовой кислоты и CO_2 при давлении 0,2 МПа (со сбросами и повышениями давления); 4 – при 105°С (с фазой вскипания) растворов сульфаминовой кислоты и при давлении CO_2 равном 0,2 МПа (со сбросами и повышениями давления)

В этом случае достигается, так называемый, синергетический эффект, а именно – возрастание эффективности очистки предлагаемыми методами, в результате интеграции, т.е. слияния отдельных наблюдаемых эффектов в единую систему процесса интенсифицированной очистки теплообменников от эксплуатационных отложений.

Таким образом, удалось получить математическую модель, адекватно оценивающую эффект воздействия трех факторов — избыточного давления CO_2 (Pco_2, МПа), концентрации сульфаминовой кислоты ($C_к$,%) и температуры моющего раствора (t,°C) на выходной параметр, т.е. на количество удаленной накипи (S_{CaCO_3} , г/л), в зависимости от значений выбранных факторов в исследованном диапазоне их изменения. Полученное уравнение регрессии и графики на рис.3 можно использовать при расчете режимов эксплуатационных очисток теплообменных аппаратов предложенными методами. Для

этого необходимо было решить очередную задачу – разработку конкретных рекомендаций по использованию предложенных усовершенствованных режимов очистки судового теплоэнергетического оборудования от эксплуатационных отложений в практике технической эксплуатации флота.

3. Разработка рекомендаций по практическому использованию на судах интенсифицированной очистки теплообменников от эксплуатационных отложений

Результаты экспериментальных исследований растворимости накипеобразователей и натуральной накипи при использовании предложенного метода интенсификации очистки указывают на возможность удаления эксплуатационных отложений из теплообменников в производственных условиях, что в свою очередь вызывает необходимость разработки технологических рекомендаций по практическому использованию этого метода очистки.

Предлагаемые ниже рекомендации основаны на результатах проведенных исследований и на использовании при эксплуатационных очистках слабых растворов сульфаминовой кислоты при повышенных давлениях CO_2, с осуществлением многократных резких сбросов и повышений давления в теплообменнике, а также с периодическим осуществлением фазы вскипания моющего раствора (при сбросах давления), что собственно и интенсифицирует процесс удаления накипных отложений с теплообменных поверхностей по сравнению с обычной химической очисткой.

Технология очистки этого типа включает подготовку оборудования к очистке, приготовление моющего раствора, непосредственно очистку оборудования, удаление отработавшего раствора и промывку теплообменника от осколков разрушенной накипи.

Принципиальная схема дооборудования теплообменника для осуществления интенсифицированной очистки от накипи представлена на рис. 4.

Перед осуществлением очистки теплообменный аппарат отключают от основного технологического цикла и через штатные смотровые лючки очищают от инородных предметов для обеспечения доступа моющей жидкости ко всей поверхности теплообмена, покрытой накипью. Затем замеряют среднюю толщину слоя накипи, по которой определяют ее общее количество в теплообменнике

$$B = \delta F \gamma / 1000,$$

где *B* — количество накипи в теплообменнике, кг; δ — средняя толщина слоя накипи, мм; F — поверхность нагрева теплообменника (по паспорту или справочнику, $м^2$); γ = 2500 кг/м3 — плотность накипи.

Зная объем воды в теплообменнике (V, м3) и количество находящейся в нем накипи (*B*, кг), по их соотношению (B / V= S_{CaCO_3} , г/л) и по полученному уравнению регрессии или графикам на рис. 3 определяют необходимую концентрацию сульфаминовой кислоты (Ск, %), достаточную для одноразового приготовления моющего раствора. Для этого предварительно выбирают тот или иной способ проведения очистки в зависимости от конкретных условий и возможностей на данный период (1 — с использованием только растворов сульфаминовой кислоты; 2 — с использованием сульфаминовой кислоты и фазой периодического вскипания моющего раствора; 3 — с использованием растворов сульфаминовой кислоты при повышенных давлениях CO_2 и с периодическими сбросами и повышениями давления; 4 — с использованием растворов сульфаминовой кислоты при повышенных давлениях CO_2 и периодическими вскипаниями моющего раствора при сбросах давления).

Определив концентрацию сульфаминовой кислоты, необходимую для осуществления какого-либо из способов очистки, находят ее расход для приготовления моюшего раствора нужной концентрации по формуле

$$G_к = 10VC_к ,$$

где $G_к$ — количество сухой сульфаминовой кислоты (100%), необходимой для приготовления моющего раствора нужной концентрации, кг; V — водяной объем теплообменника, $м^3$; $C_к$ — необходимая концентрация сульфаминовой кислоты, %.

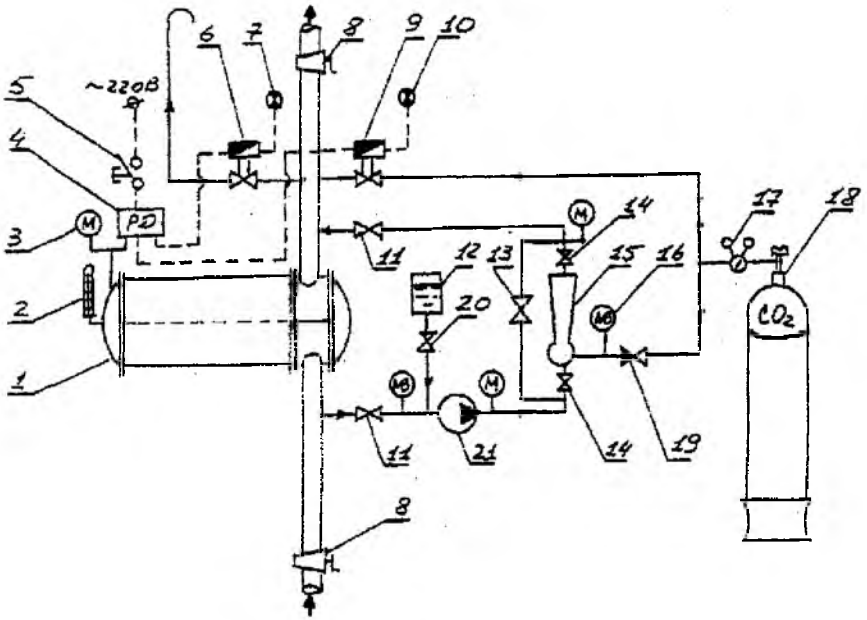

Рис. 4. Принципиальная схема установки интенсифицированной очистки теплообменника от накипи: 1 — теплообменный аппарат; 2 — термометр; 3 — манометр на теплообменнике; 4 — реле давления; 5 — тумблер для подачи питания на реле давления; 6 — электромагнитный клапан для сообщения теплообменника с атмосферой; 7 — сигнальная лампочка клапана сброса давления: 8 — секущие клинкеты; 9 — электромагнитный клапан для сообщения теплообменника с баллоном со сжатой CO_2; 10 — сигнальная лампочка клапана подачи CO_2; 11 — клапаны для подключения насыщающей установки к теплообменнику; 12 — бак для приготовления моющего раствора; 13 — байпасный клапан; 14 — клапаны для отключения эжектора от контура циркуляции; 15 — водогазовый эжектор; 16 — мановакуометр эжектора; 17 — газовый редуктор; 18 — баллон с CO_2; 19 — невозвратно — запорный клапан для подвода CO_2 к эжектору; 20 — клапан для подвода моющего раствора на всасывание рабочего насоса; 21 — рабочий насос очистной установки.

Пример расчета

Определить количество сульфаминовой кислоты, необходимой для приготовления моющего раствора нужной концентрации для очистки от накипи теплообменного аппарата интенсифицированным способом, например, при одновременном использовании раствора

сульфаминовой кислоты и давлении CO_2 0,2 МПа, а также периодических фазах вскипания перегретого относительно температуры насыщения моющего раствора.

Исходные данные: $\delta = 1{,}0$ мм; $F = 10$ м^2; $\gamma = 2500$ кг/м3; $V = 2{,}0$ м^3.

Определяем количество накипи в теплообменнике:

$$B = \delta F \gamma / 1000 = 25 \text{ кг}.$$

Определяем соотношение B/V т.е. количество накипи, приведенное к единице объёма моющего раствора:

$$S_{CaCO_3} = B/V = 12{,}5 \text{ кг/м}^3 (\text{г/л}).$$

По кривой 4 на рис. 3 определяем необходимую для этого случая концентрацию раствора сульфаминовой кислоты $C_к = 1{,}62\%$.

В этом случае расход сухой сульфаминовой кислоты для приготовления раствора с концентрацией $C_к = 1{,}62$ % составит

$$G_k = 10VC_к = = 32{,}4 \text{ кг}$$

Если бы проводилась обычная химическая (кислотная) очистка, то для удаления того же количества накипи (25 кг) необходимо было бы использовать сульфаминовую кислоту с минимальной концентрацией 2,66% (кривая 1 на рис. 3), а ее расход для данного теплообменника при этом составил бы более 53 кг.

Интенсифицированную очистку рекомендуется осуществлять следующим образом (см. рис. 4).

После полного заполнения теплообменника 1 водой закрывают секущие клинкеты 8, изолируя таким образом водяной объем теплообменника от штатных систем. Готовят моющий раствор, для чего растворяют в растворном баке 12 расчетное количество сухой сульфаминовой кислоты и, открывая затем клапаны 11 и 13, запускают рабочий насос 21, обеспечивая циркуляцию воды через теплообменник. Приоткрывая клапан 20, подают маточный раствор кислоты на всасывание рабочего насоса 21. После подачи всего раствора в контур циркуляции закрывают клапаны 20 и 13 и открывают клапаны 14, обеспечивающие прохождение воды через водогазовый эжектор 15. Убедившись по мановакуумметру 16 в нормальной работе эжектора (т.е. создании вакуума во всасывающей камере), открывают невозвратно-запорный клапан 19 и редуктором 17 на баллоне с CO_2 устанавливают давление подачи углекислого газа к эжектору порядка 0,03-0,05 МПа. Таким образом производят насыщение моющего раствора двуокисью углерода. Продолжительность насыщения определяют временем трех-четырёхкратной замкнутой циркуляции раство-

ра через теплообменник, исходя из производительности рабочего насоса и количества воды в теплообменнике.

Затем останавливают рабочий насос 21 и редуктором 17 устанавливают давление подачи CO_2 в теплообменник на уровне 0,2 МПа, но не выше рабочего давления в теплообменнике. Контроль давления в теплообменнике производят по манометру 3.

Повышение давления CO_2 интенсифицирует процесс растворения накипи с одновременным образованием раствора с избыточным газосодержанием. Теплообменник выдерживают при этом давлении до стабилизации величины pH газонасыщенного моющего раствора (ориентировочно 3-4 часа). Величина pH при этом контролируется по индикаторной бумаге.

Повышение и дальнейшая стабилизация величины pH моющего раствора на постоянном уровне свидетельствует о его истощении и практическом прекращении процесса чисто химического растворения накипи. На этом этапе при контакте накипи с моющим раствором происходит ее частичное растворение и зарождение в контактирующем слое накипи поверхностных дефектов (поры, язвы и т.п.), через которые газонасыщенный агрессивный раствор проникает под слой накипи к поверхности нагрева.

После выдержки под давлением закрывают клапаны 11, невозвратно-запорный клапан 19 и тумблером 5 подают питание на реле давления 4.

Необходимо отметить, что реле давления 4, имеющее две пары контактов (при соответствующем давлении в теплообменнике одна пара контактов замкнута, а другая разомкнута), должно быть настроено таким образом, чтобы при достижении установленного максимального давления происходило замыкание контактов, подающих питание на электромагнитный клапан 6, который сразу же открывается. В то же время размыкаются контакты, управляющие открытием электромагнитного клапана 9, и он закрывается. При снижении же давления в теплообменнике до уровня давления окружающей среды происходит перераспределение подачи питания на электромагнитные клапаны — клапан 6 закрывается, а клапан 9 тут же открывается.

Таким образом, при подаче питания на реле давления 4 происходит открытие электромагнитного клапана 6, сообщающего теплообменник с атмосферой, что приводит к резкому сбросу давления в теплообменнике до давления окружающей среды. За этим следует мгновенное газовыделение из моющего раствора и в первую очередь

в местах дефектов накипи, что вызывает ее частичное разрушение и отслаивание от поверхности нагрева. В момент достижения в теплообменнике уровня давления окружающей среды закрывается электромагнитный клапан 6 и тут же открывается клапан 9. сообщающий теплообменник с баллоном 18 со сжатой CO_2. Происходит резкое повышение давления в теплообменнике до первоначально установленного значения, что вызывает схлопывание образовавшихся газовых пузырьков, приводящее к ударному воздействию микрообъемов моющей жидкости на накипные отложения. Этот процесс сопровождается дальнейшим обширным разрушением накипи. Затем вновь происходит открытие клапана 6 и так далее многократно.

Таким образом, после включения тумблера 5 процесс разрушения накипи осуществляется без участия обслуживающего персонала, т.е. в автоматическом режиме.

Моменты открытия соответствующих электромагнитных клапанов можно контролировать при этом по сигнальным лампочкам 7 и 10.

Следующий этап интенсифицированной очистки возможен для теплообменников кипящего типа (например, для испарителей избыточного давления, вспомогательных и утилизационных котлов и т.п.). Для этого моющий раствор перегревают при повышенном давлении относительно температуры насыщения, соответствующей атмосферному давлению. Контроль температуры в теплообменнике осуществляют по термометру 2. На время нагрева моющего раствора тумблер 5 отключают. Затем серия циклов по резкому снижению и повторному повышению давления в теплообменнике возобновляется (при осуществлении постоянного нагрева моющего раствора), т.е. вновь включается тумблер 5. Это вызывает периодическое вскипание моющей жидкости (и в первую очередь у поверхности нагрева) при снижении давления до атмосферного и прекращение процесса кипения при повышении давления в теплообменнике. Такая обработка приводит к еще большему разрушению накипи генерируемыми на поверхности нагрева паровыми пузырьками. Продолжительность обработки выбирают экспериментально для каждого конкретного случая.

После полной очистки теплообменника от накипи прекращают нагрев моющего раствора и выключают тумблер 5. что приводит к закрытию электромагнитных клапанов 6 и 9. Затем открывают секущие клапаны 8 и промывают теплообменник водой от штатного цир-

куляционного насоса для удаления отработавшего раствора и осколков разрушенной накипи.

В случае кислой реакции моющего раствора нейтрализуют остатки кислоты едким натром до нейтральной среды по метилоранжу согласно известной методике [5].

После окончания очистки вскрывают и осматривают теплообменник через смотровые лючки для оценки состояния его теплообменных поверхностей.

При организации и проведении работ по очистке теплообменника от накипи должны соблюдаться правила техники безопасности. Несмотря на то, что сульфаминовая кислота в сухом виде безвредна, ее нужно смывать при попадании на кожу и одежду. Ее водный раствор (в определенной концентрации) представляет собой сильную минеральную кислоту. Поэтому лица, проводящие очистку с использованием сульфаминовой кислоты, должны иметь спецодежду и защитные очки. При попадании на кожу кислоту надо снять ватным тампоном, промыть 2%-ным раствором питьевой соды и смазать вазелином; при попадании кислоты в глаза — немедленно промыть их водой и обратиться к врачу. При осуществлении сбросов и повышений давления в теплообменнике следует руководствоваться правилами работы с сосудами под давлением.

Отдельные положения приведенных рекомендаций по практическому применению интенсифицированной очистки теплообменников от накипи могут уточняться в соответствии с конкретными условиями и техническими возможностями.

В заключение необходимо отметить также, что при проведении последующих натурных испытаний разработанных способов на реальных судовых теплообменниках, работающих на морской воде (на паровом подогревателе морской воды типа РО-4 и на конденсаторе турбогенератора типа ХВС-120), была установлена возможность удаления с теплообменных поверхностей (кроме накипных отложений) также и раковин организмов морских обрастателей. Это, в свою очередь, значительно расширяет область применения, предлагаемых для использования способов очистки судового теплоэнергетического оборудования от эксплуатационных отложений.

Приоритетность, предлагаемых для использования решений, подтверждена двумя авторскими свидетельствами на изобретения [3, 4].

Выводы

1. В представленной работе в результате выполнения и анализа литературных, поисковых, постановочных и экспериментальных исследований, а также натурных испытаний в производственных условиях, были обоснованы, описаны и предложены способы усовершенствования (интенсификации) режимов очистки судового теплоэнергетического оборудования от эксплуатационных отложений.
2. Установлено, что растворимость $CaCO_3$ в растворах сульфаминовой кислоты при повышенных давлениях CO_2 увеличивается, по сравнению с его растворимостью в обычных кислотных растворах.
3. Периодические резкие сбросы и последующие повышения CO_2 в теплообменнике, осуществляемые многократно, также интенсифицируют процесс разрушения накипных отклонений.
4. Введение фазы периодического вскипания, агрессивного к накипи моющего раствора, в свою очередь нарушает прочность накипных отклонений и вызывает их отслаивание от поверхности нагрева, что также повышает эффективность предложенных методов очистки.
5. В результате обобщения литературных и экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение регрессии для определения количества удаляемых с теплообменных поверхностей отложений, в зависимости от давления CO_2, концентрации сульфаминовой кислоты и температуры моющего раствора (при осуществлении фаз его периодического вскипания), позволяющее прогнозировать эффективность очистки предлагаемыми методами.
6. Кроме того, при проведении натурных испытаний в судовых условиях, установлена возможность использования разработанных режимов для удаления с теплообменных поверхностей также и раковин организмов морских обрастателей, что расширяет область применения предлагаемых способов.
7. На основании полученных результатов разработаны рекомендации по практическому использованию на судах интенсифицированных режимов очистки теплоэнергетического оборудования от эксплуатационных отложений и предложена принципиальная схема дооборудования теплообменника при осуществлении этих режимов.
8. Возможность практической реализации разработанных способов

очистки, подтверждена двумя авторскими свидетельствами на изобретения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов В. А. Накипеобразование в судовых теплообменниках, методы их очистки и растворимость $CaCO_3$ в растворах сульфаминовой кислоты при повышенных давлениях CO_2 //Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.- 2013. - №31. – Одесса: ОНМА. – С.5-24.
2. Перепёлкин С. Е. Газовые эмульсии /С. Е. Перепёлкин, В. С. Матвеев. – Л.: Химия, 1979. -200с.
3. Способ очистки теплообменника от накипи: А.с. №1499086 СССР, МКИ F28G 9/00, B08B 3/08/ В.А. Абрамов, Ю. И. Боев, В. А. Вагапов, В. Ф. Коваленко, И. А. Станкевич, Б. А. Павленко - №4300731/31-12. Заявл. 24.06.1987. Опубл. 07.08.1989, Бюл. №29.
4. Способ очистки теплообменника от накипи: А.с. №1747850 СССР, МКИ F28G 9/00/ В.А. Абрамов, В. Ф. Коваленко, В. Н. Скрипник - №4783403/12. Заявл. 17.01.1990. Опубл. 15.07.1992, Бюл. №26.
5. Сурин С. М. Химическая очистка судового энергетического оборудования / С. М. Сурин. – М.: Транспорт, 1981.- 168 с.
6. Максин В. М. Использование сульфаминовой кислоты для удаления карбонатной накипи из системы горячего водоснабжения / В. М. Максин и др. // Химия и технология воды. – 1989. – Т.11. - №7. – С. 630-636.
7. Михайлов В. И. Планирование эксперимента в судостроении /В. И. Михайлов, К. М. Федотов. – Л.: Судостроение, 1978. – 160 с.
8. Абрамов В. А. Предотвращение накипеобразования в судовых теплообменных аппаратах и системах, контактирующих с морской водой: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Одесса: ОВИМУ, 1985. – 24 с.
9. Углекислотный метод очистки теплообменников от накипи и предотвращения её образования: Метод. пос. /ОВИМУ; подг. Ю. И. Боевым. – М.: Мортехинформреклама, 1986. - 48 с.