

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОГО РАСХОДА ВЫПАРА ТЕРМИЧЕСКОГО ДЕАЭРАТОРА

В.И. Шарапов, О.В. Пазушкина

ГОУ ВПО Ульяновский государственный технический университет

Приведено выполненное авторами промышленное экспериментальное исследование атмосферного струйно-барботажного деаэраатора ДА-25 конструкции НПО ЦКТИ. В результате проведенного исследования работы деаэраатора удалось доказать необходимость и возможность снижения нормативного удельного расхода выпара. Установлена возможность обеспечения нормативного качества воды при существенном приближении реального расхода выпара к теоретической величине.

Ключевые слова

Деаэраатор, выпар, тепломассообмен, эксперимент.

Условные обозначения

$G_{x.o.в}$, $G_{д.в}$ – количества исходной химически очищенной воды, подаваемой в деаэраатор, и деаэрированной воды на выходе из деаэраатора, т/ч; $D_{вып}$ – расход выпара, т/ч; $X_{x.o.в}$, $X_{др.п}$ – концентрации кислорода в химочищенной воде на входе в деаэраатор и других потоках (дренажах), отправляемых на деаэрацию, мг/дм³; $X_{д.в}$ – то же на выходе из деаэраатора, мг/дм³; $X_{общ}$ – общая средневзвешенная концентрация кислорода всех потоков, подводимых в деаэраатор, мг/дм³ (составляет 5900 мг/дм³); Y_n , $Y_{вып}$ – содержание кислорода в греющем паре на входе в деаэраатор и в выпаре на выходе из деаэраатора, мг/дм³; $i_{x.o.в}$, $i_{др.п}$, $i_{д.в}$ – энтальпии соответственно химически очищенной воды, других потоков, направляемых на деаэрацию, и деаэрированной воды, кДж/кг; i_n , $i_{вып}$ – энтальпии греющего пара и выпара деаэраатора, кДж/кг; K_G – коэффициент Генри (константа фазового равновесия), Па; p – общее давление смеси, Па; $d_{вып}^{теор}$ – удельный расход выпара, кг/т.

Введение. Постановка задачи

Термическая деаэрация является основным методом противокоррозионной обработки питательной воды котлов и подпиточной воды систем теплоснабжения. Деаэрация представляет собой сочетание процессов теплообмена (нагрева деаэрируемой воды до температуры насыщения) и массообмена (удаления коррозионно-активных газов из воды в паровую среду). Массообменная и энергетическая эффективность термических деаэрааторов во многом определяют вид тепловой схемы, надежность и экономичность теплоэнергетической установки в целом.

Для определения резервов совершенствования термических деаэраторов и для изучения возможностей снижения энергетических затрат на деаэрацию необходима количественная оценка предельно достижимой тепломассообменной эффективности термической деаэрации.

Эффективность десорбции растворенных в воде коррозионно-активных газов при термической деаэрации в значительной мере определяется расходом пара – отводимой из деаэратора смеси удаленных из воды неконденсирующихся газов и неконденсировавшейся части десорбирующего агента. В работах [1, 2] выполнена оценка величины минимально возможного количества пара термических деаэраторов, показывающего предел совершенствования деаэрационных установок, к которому следует стремиться при их проектировании и эксплуатации. Установлено значительное различие между реальными, нормативными и теоретическими значениями расхода пара, что говорит о настоящей необходимости снижения реального количества отводимого из деаэратора пара.

Задачи эксперимента

В работе рассмотрено проведенное экспериментальное исследование атмосферного струйно-барботажного деаэратора ДА-25 конструкции НПО ЦКТИ, установленного на Ульяновской ТЭЦ-3 [3]. Задачами эксперимента явились:

1) экспериментальное определение технологически необходимого расхода пара деаэратора и сравнение этого расхода с минимальным теоретическим удельным расходом;

2) уточнение температурного режима атмосферной деаэрации.

Решение этих задач необходимо для оценки возможности приближения реального расхода пара к теоретически определенной величине и степени обоснованности требований стандарта.

Важной особенностью эксперимента, обеспечившей новизну результатов, их высокую точность и решение поставленных задач, было использование современных автоматических анализаторов кислорода и проведение эксперимента на деаэраторе современной конструкции.

Описание экспериментальной установки

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

Химически очищенная вода, обработанная методом *Na*-катионирования, перед деаэратором подогревается в пароводяном теплообменнике и подается в верхнюю часть деаэрационной колонки. Кроме того, в деаэратор подаются потоки конденсата с подогревателей ПСВ-500 и ПСВ-90 и дренажного бака.

Химически очищенная вода 1 через охладитель пара 2 и регулирующий клапан 4 попадает в деаэрационную колонку 6. Туда же направляется поток основного конденсата 7 с температурой ниже рабочей температуры деаэратора. Деаэрационная колонка устанавливается у одного из торцов деаэрационного бака 9. Отвод деаэрированной воды 14 осуществляется из противоположного торца бака с целью обеспечения максимального времени выдержки воды в баке. В качестве греющего агента деаэратора используется редуцированный пар котла ДЕ-10/14. Весь пар подводится по трубе 13 через регулирующий клапан давления 12 в торец бака, противоположный колонке, с целью обеспечения хорошей вентиляции парового объема от выделяющихся из воды газов. Горячие конденсаты подаются в деаэрационный бак по трубе 10. Отвод пара из установки осуществляется через охладитель пара 2 и трубу 3 или непосредственно в атмосферу по трубе 5.

Для защиты деаэратора от аварийного повышения давления и уровня воды устанавливается самозаливающее комбинированное предохранительное устройство 8. Периодическая проверка качества деаэрированной воды на содержание кислорода и свободной углекислоты производится с помощью теплообменника для охлаждения проб воды 15.

Термический деаэратор атмосферного давления ДА-25 состоит из деаэрационной колонки, установленной на аккумуляторном баке. В деаэраторе применена двухступенчатая схема дегазации: первая ступень – струйная, вторая – барботажная, причем обе ступени размещены в деаэрационной колонке.

Проверка качества деаэрированной воды на содержание кислорода и диоксида углерода производилась с помощью теплообменника для охлаждения проб воды 15.

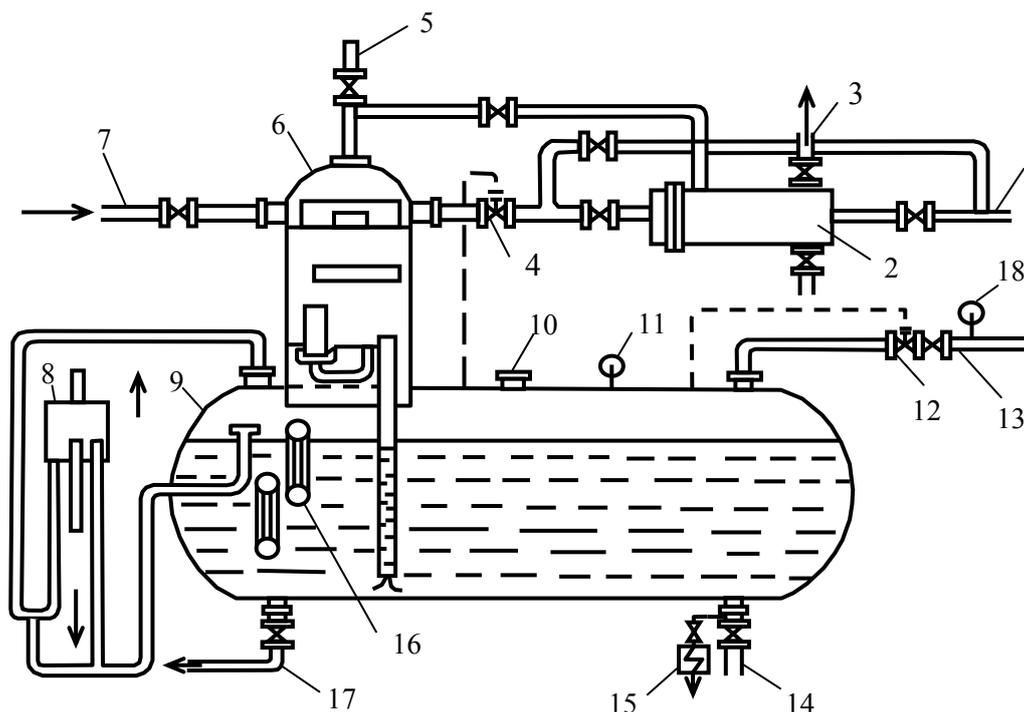


Рис. 1. Схема деаэрационной установки атмосферного давления: 1 – подвод химически очищенной воды; 2 – охладитель выпара; 3, 5 – выхлоп в атмосферу; 4 – клапан регулировки уровня; 6 – деаэрационная колонка; 7 – подвод основного конденсата; 8 – предохранительные устройства; 9 – деаэрационный бак; 10 – подвод горячих конденсатов; 11 – манометр; 12 – клапан регулировки давления; 13 – подвод греющего пара; 14 – отвод деаэрированной воды; 15 – охладитель пробы; 16 – указатель уровня; 17 – дренаж; 18 – мановакууметр

Потоки воды, подлежащие деаэрации, подаются в колонку 1 (рис. 2) через патрубки 2 на верхнюю перфорированную тарелку 3. С последней вода стекает струями на расположенную ниже перепускную тарелку 4, откуда узким пучком струй увеличенного диаметра сливается на начальный участок непровального барботажного листа 5. Затем вода проходит по барботажному листу в слое, обеспечиваемом переливным порогом (выступающая часть сливной трубы), и через сливные трубы 6 сливается в аккумуляторный бак 8, после выдержки в котором отводится из деаэратора по трубе отвода деаэрированной воды.

Весь пар подается в аккумуляторный бак деаэратора по трубе 13, вентилирует объем бака и попадает под барботажный лист 5. Проходя через отверстия барботажного

листа, площадь которых выбрана с таким расчетом, чтобы исключить провал воды при минимальной тепловой нагрузке деаэратора, пар подвергает воду на нем интенсивной обработке.

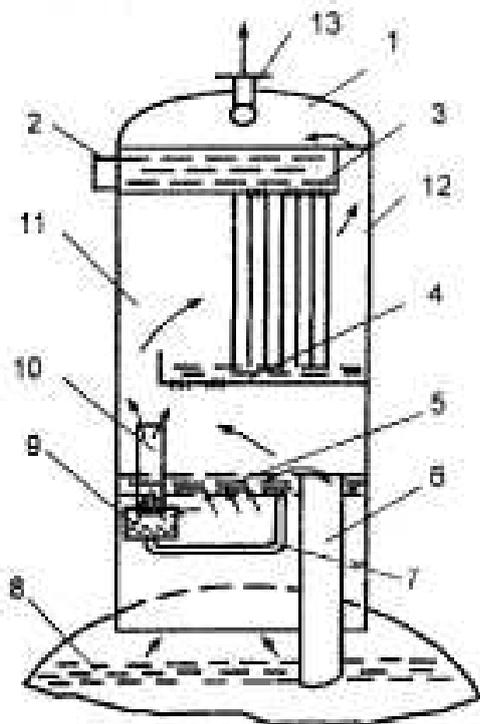


Рис. 2. Схема деаэрационной колонки ДА-25 с барботажной ступенью: 1 – колонка деаэратора; 2 – патрубок подвода воды на деаэрацию; 3 – верхняя перфорированная тарелка; 4 – перепускная тарелка; 5 – барботажный лист; 6 – сливная труба; 7 – труба для залива гидрозатвора; 8 – аккумуляторный бак; 9 – гидрозатвор перепускного устройства; 10 – пароперепускная труба; 11 – отверстие для прохода пара; 12, 13 – зазор и патрубок для отвода выпара из деаэратора

При увеличении тепловой нагрузки давление в камере под листом 5 возрастает, срабатывает гидрозатвор перепускного устройства 9 и избыточный пар перепускается в обвод барботажного листа через пароперепускную трубу 10. Труба 7 обеспечивает залив гидрозатвора перепускного устройства деаэрированной водой при снижении тепловой нагрузки. Из барботажного листа пар через отверстие 11 направляется в отсек между тарелками 3 и 4. Парогазовая смесь (выпар) отводится из деаэратора через зазор 12 и патрубок 13. В струях происходит подогрев воды до температуры, близкой к температуре насыщения, удаление основной массы газов и конденсация большей части подводимого в деаэратор пара. Частичное выделение газа из воды в виде мелких пузырьков происходит на тарелке 3 и 4. На барботажном листе происходит подогрев воды до температуры насыщения с незначительной конденсацией пара и удаление микроколичеств газов. Процесс дегазации завершается в аккумуляторном баке, где происходит выделение из воды мельчайших пузырьков газа.

Корпус деаэратора изготовлен из углеродистой стали, внутренние элементы – из нержавеющей стали.

Деаэратор ДА-25 установлен на отметке 18 м.

На рис. 3 показана схема размещения измерительных приборов.

Весь выпар, образовавшийся в процессе дегазации воды, охлаждается в охладителе выпара типа ОВА-2, с площадью поверхности теплообмена 2 м², установленном на одной отметке с деаэратором. Охлаждающей средой в охладителе служит исходная химически очищенная вода. Конденсат выпара сбрасывается в дренажный бак, установленный на нулевой отметке.

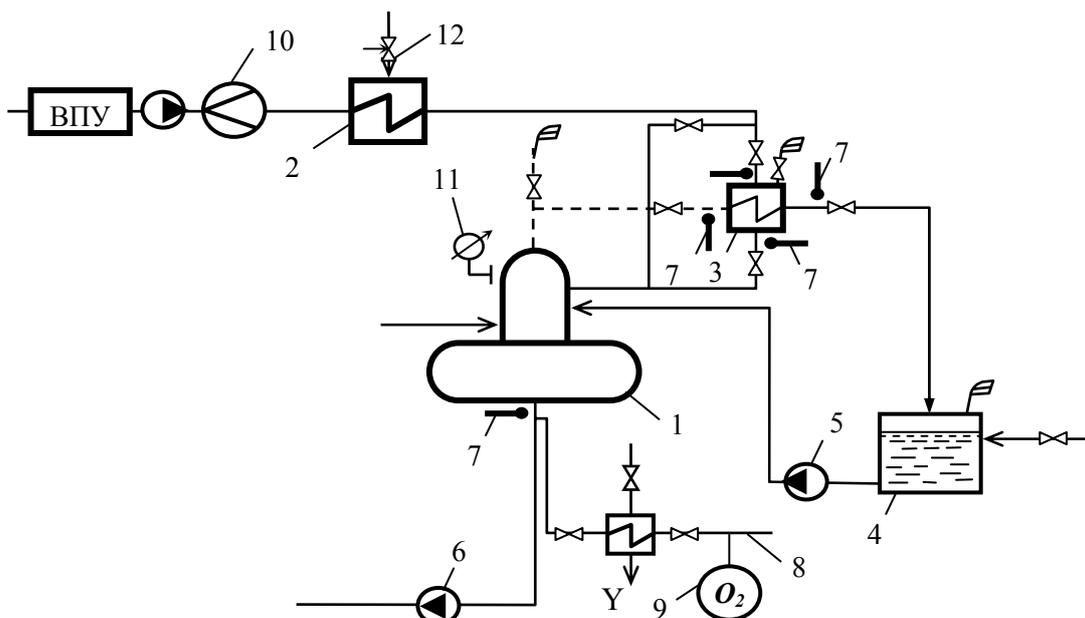


Рис. 3. Схема размещения измерительных приборов в деаэрационной установке: 1 – атмосферный деаэратор; 2 – подогреватель химочищенной воды; 3 – поверхностный охладитель выпара; 4 – дренажный бак; 5 – насос дренажного бака; 6 – питательный насос; 7 – термометры; 8 – пробоотборник; 9 – автоматический кислородомер; 10 – расходомер; 11 – манометр; 12 – регулирующий клапан

Методика проведения эксперимента

Для проведения экспериментального исследования выбран метод однофакторного активного эксперимента, т.е. изменение одного из факторов при фиксированной величине других параметров.

В качестве изменяемого фактора в одном случае принимался расход выпара атмосферного деаэратора, в другом – температура исходной воды, подаваемой в деаэратор. Изменение расхода выпара проводилось с помощью задвижки, установленной на трубопроводе отвода выпара в охладитель. Изменение расхода выпара осуществлялось ступенчато через определенные интервалы времени, обусловленные временем самовыравнивания объекта регулирования – термического деаэратора – после нанесения ему однократного возмущения, до полного закрытия задвижки, а затем поэтапного ее открытия.

Другим регулирующим фактором была температура исходной воды перед охладителем выпара. Изменение ее проводилось также ступенчато, путем увеличения или уменьшения расхода пара на подогрев исходной воды в подогревателе.

Всего было поставлено 2 серии опытов.

Как уже отмечалось, одной из основных задач эксперимента было определение технологически необходимого расхода выпара и сравнение его с минимальным теоретическим удельным расходом. Поскольку приборов, позволяющих замерить реальное количество отводимого из деаэратора выпара, не существует, измерение этой величины проведено косвенным путем. Для этого измеряемыми аргументами были выбраны температура исходной химически очищенной воды и выпара до и после охладителя, расход исходной воды, давление в деаэрационной колонке (см. рис. 3), а функцией – расход выпара, определяемый из уравнения теплового баланса охладителя выпара.

Измерения расходов и температур проводились штатными стационарными приборами. Измерение расхода исходной воды, подаваемой в деаэратор, дублировалось ультразвуковым портативным расходомером – счетчиком УРСВ «ВЗЛЕТ–ПР». Измерение температур потоков, идущих в охладитель выпара и после него дублировалось образцовыми лабораторными ртутными термометрами с ценой деления 0,1 °С.

Замеры остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде производились с помощью автоматического малогабаритного анализатора – кислородомера «МАРК-301Т» производства ООО «ВЗОР». Портативный автоматический кислородомер, установленный на пробоотборной точке и подключенный к потоку, идущему после бака-аккумулятора деаэратора ДА-25, позволил вести непрерывный мониторинг остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде. Измерения проводились при температуре пробы 30±5 °С.

Предел допускаемой основной абсолютной погрешности показаний анализатора при измерении концентрации растворенного кислорода составляет ±0,012Y (где Y – измеренное значение концентрации растворенного кислорода в мг/дм³). Кроме того, проводились химические анализы содержания кислорода в обрабатываемых потоках и деаэрированной воде с помощью метиленового голубого.

Начальная концентрация растворенного кислорода в исходной химически очищенной воде составляла в период испытаний 13 мг/дм³, в конденсате ПСВ-90 – 0,06 мг/дм³, в конденсате ПСВ-500 – 1,14 мг/дм³, в потоке после дренажного бака – 2,6 мг/дм³.

Анализ экспериментальных данных

В ходе эксперимента, выполненного на Ульяновской ТЭЦ-3, доказана возможность существенного снижения удельного расхода выпара по сравнению с расходом выпара, указанным в нормативном документе [2].

Теоретический удельный расход выпара $d_{вып}^{теор}$, кг/т, необходимый для удаления из воды растворенного кислорода, определяется по методике, изложенной в [1, 2], при условии, что на выходе из деаэратора достигается равновесие между жидкой и парогазовой фазами:

$$G_{x.o.c} X_{x.o.c} + G_{др.н} X_{др.н} + D_n Y_n = G_{д.с} X_{д.с} + D_{вып} Y_{вып}. \quad (1)$$

Расход греющего пара может быть определен из уравнения теплового баланса деаэратора:

$$D_n = \frac{G_{д.с} (i_{д.с} - i_{др.н}) + D_{вып} (i_{вып} - i_{др.н}) - G_{x.o.c} (i_{x.o.c} - i_{др.н})}{i_n - i_{др.н}}. \quad (2)$$

Тогда теоретически необходимый расход выпара определяется по уравнению

$$D_{вып}^{теор} = \frac{G_{x.o.c} [X_{x.o.c} (i_n - i_{др.н}) - X_{др.н} (i_n - i_{x.o.c})]}{\frac{K_\Gamma}{p} X_{общ} (i_n - i_{др.н}) - X_{др.н} (i_n - i_{вып})} + \frac{G_{д.с} [X_{др.н} (i_n - i_{д.с}) - X_{д.с} (i_n - i_{др.н})]}{\frac{K_\Gamma}{p} X_{общ} (i_n - i_{др.н}) - X_{др.н} (i_n - i_{вып})} \quad (3)$$

Удельный расход выпара $d_{вып}^{теор}$ составит

$$d_{вып}^{теор} = 10^3 \frac{D_{вып}^{теор}}{G_{x.o.c} + G_{др.н}}. \quad (4)$$

Результаты расчета теоретического расхода выпара по формулам (3) и (4) при подогреве воды в деаэраторе редуцированным паром ($i_n = 2800$ кДж/кг), указанных выше концентрациях кислорода в обрабатываемых потоках и измеренных значениях содержания растворенного кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора, представлены на рис. 4.

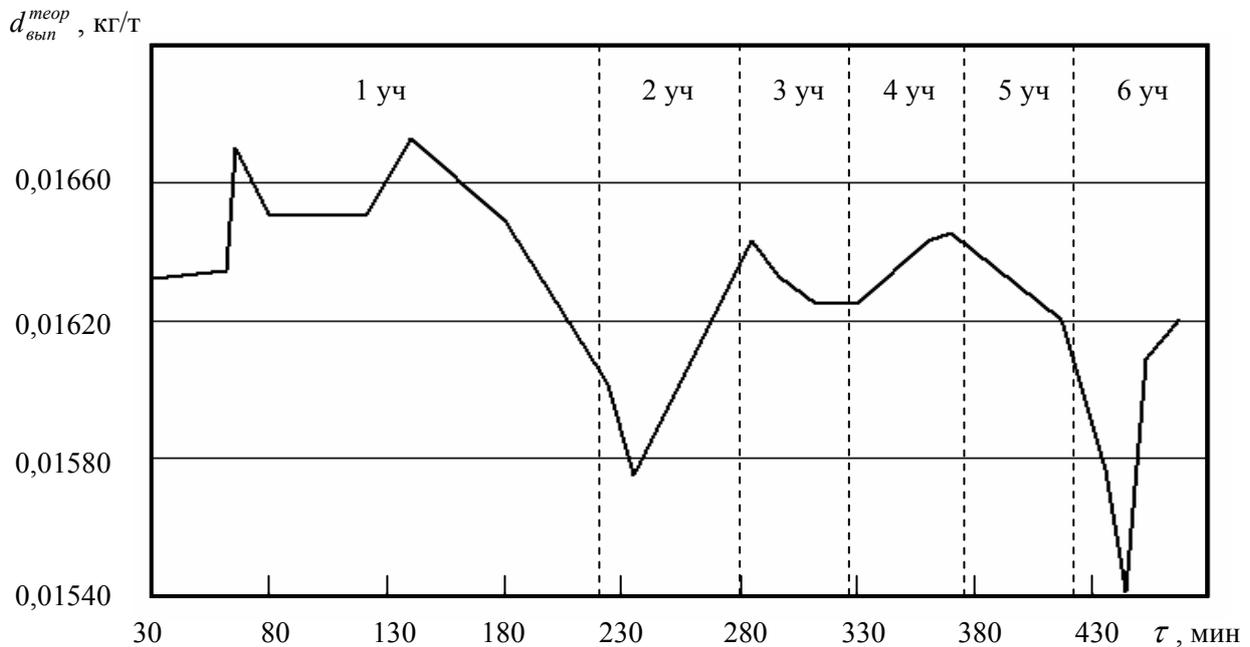


Рис. 4. Изменение теоретически необходимого удельного расхода выпара ДА-25 по времени

В результате испытаний атмосферного деаэратора ДА-25 получены значения регулируемых и регулирующих факторов процесса деаэрации, изменяющихся во времени, на основании которых построены графические динамические характеристики. Все изменения расхода исходной химически очищенной воды в течение времени проведения эксперимента незначительны ($G_{x.o.b} = 6,1 \pm 0,3$ т/ч), что говорит о довольно стабильном режиме работы деаэратора в период эксперимента и отсутствии существенного влияния изменений расхода исходной воды на результаты эксперимента.

На рис. 5 представлена динамика изменения регулирующего фактора $d_{вып}$ во времени по результатам первой серии опыта.

Во время проведения эксперимента ставилась задача оценить влияние на эффективность деаэрации температуры исходной воды, которая регулировалась путем изменения расхода пара на подогрев исходной воды в подогревателе, а также путем увеличения и уменьшения величины выпара, отводимого из деаэратора в охладитель.

Из анализа графиков на рис. 4 и рис. 5 следует, что в ходе эксперимента на 70-220 минутах удалось снизить удельный расход выпара до значений $1,85-0,07$ кг/т и максимально приблизиться к значению теоретически необходимого расхода выпара без ущерба для качества деаэрации (остаточная концентрация кислорода в деаэрированной воде составляла $11-17$ мкг/дм³).

На рис. 6 приведена зависимость остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде от времени при изменении расхода выпара и температуры

исходной воды, построенная путем аппроксимации экспериментальных данных. Средняя дисперсия данных составляет 2,2 при уровне надежности 0,95.

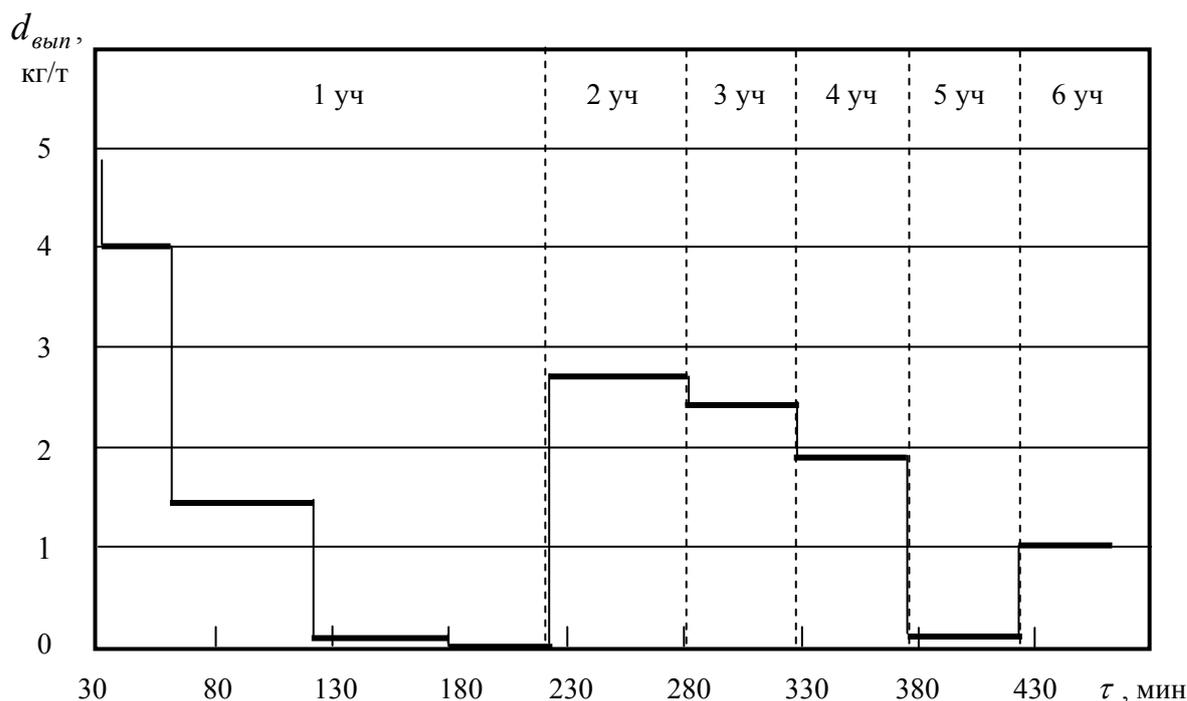


Рис. 5. Динамика изменения удельного расхода выпара ДА-25: 1 участок – снижение расхода выпара с 4,81 кг/т до 0,03 кг/т при поэтапном закрытии задвижки (температура исходной воды 50 °С); 2 участок – увеличение расхода выпара; 3 участок – увеличение температуры исходной воды до 85°С; 4 участок – снижение температуры исходной воды до 35 °С; 5 участок – снижение расхода выпара (температура исходной воды 35 °С); 6 участок – увеличение расхода выпара

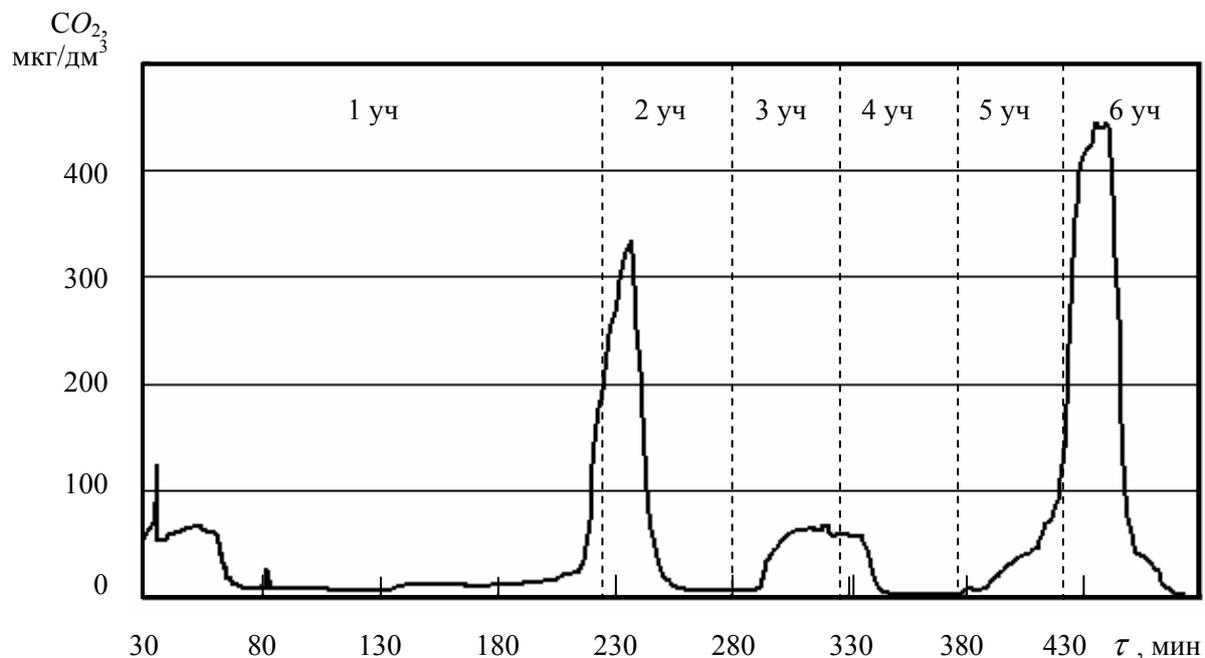


Рис. 6. Динамика изменения остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде при различных расходах выпара и различных температурах исходной воды

Графики 4, 5 и 6 взаимосвязаны и позволяют определить количество выпара, необходимое и достаточное для достижения нормативного качества деаэрированной воды. Каждый скачок на графике 6 соответствует однократному изменению входной величины (расхода выпара или температуры). Постепенное выравнивание линии говорит о процессе самовыравнивания в деаэраторе.

Проведенный эксперимент опровергает устоявшееся на протяжении 30 лет и регламентированное документами [4] положение о том, что температура исходной воды перед деаэратором атмосферного давления должна поддерживаться в пределах 60-90 °С, а нагрев воды в атмосферном деаэраторе должен лежать в пределах 10-50 °С. Установлено, что нормативной эффективности деаэрации воды в атмосферных деаэраторах удается достигнуть при температуре исходной воды 30-45 °С и при средней величине нагрева деаэрируемых потоков в деаэраторе 40-60 °С.

В результате проведенного экспериментального исследования работы деаэратора атмосферного давления методом активного эксперимента [3] удалось доказать необходимость и возможность снижения нормативного удельного расхода выпара. Установлена возможность обеспечения нормативного качества воды при расходе выпара 0,07-1,85 кг/т, т.е. при существенном приближении к величине теоретического удельного расхода выпара.

Выводы

1. Разработана методика определения теоретически необходимого количества выпара термических деаэраторов для различных схем движения теплоносителей. Знание величины минимально возможного количества выпара необходимо для оценки и поиска путей повышения массообменной и энергетической эффективности термических деаэраторов.

2. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование тепло- и массообменной эффективности термического деаэратора ДА-25 конструкции НПО ЦКТИ. В результате проведенного исследования методом активного эксперимента установлена возможность обеспечения нормативного качества воды при расходе выпара 0,07-0,12 кг/т, т.е. при существенном приближении к величине теоретического удельного расхода выпара, составляющей 0,02 кг/т (против нормативной величины 2 кг/т).

Литература

- [1] Шарапов В.И., Малинина (Пазушкина) О.В. Определение теоретически необходимого расхода выпара термических деаэраторов // Теплоэнергетика. 2004. № 4. С. 63-66.
- [2] Малинина (Пазушкина) О. В., Цюра Д. В., Шарапов В. И. Оценка предельно возможной тепломассообменной эффективности термических деаэраторов // Материалы V Минского Международного форума по тепло- и массообмену. Т. 2. Минск: НАТБ. 2004. С. 312-314.
- [3] Малинина (Пазушкина) О. В. Исследование влияния расхода выпара и способов его утилизации на эффективность термической деаэрации воды. Дисс... канд. техн. наук. Иваново: ИГЭУ. 2004.
- [4] ГОСТ 16860-88*. Деаэраторы термические. Типы, основные параметры, приемка, методы контроля. М.: Изд-во стандартов. 1989. 6 с.