

Подставляя в формулу (6) уравнение (8), получим уравнение температурной кривой

$$t_{II} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left(\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,28} \right)^{0,43} ;$$

$$t_{II} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,55} .$$
(9)

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 590 с.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Белорусская наука, 2010. – 443 с.
3. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
4. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 2013 – Т. 86, № 3. – С. 584–594.

УДК: 66.048.5-957

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОСТОГО ВЫПАРИВАНИЯ

**Александровская М. К., студ., Овчинников В. А., студ.,
Пашаев А. Р., студ., Агафонова И. В., к.т.н., доц.**

Российский институт транспорта (РУТ), г. Москва, Российская Федерация

Реферат. В статье рассмотрен процесс концентрации растворов методом простого выпаривания, широко применяемый в таких отраслях промышленности, как пищевая, химическая, фармацевтическая, а также для опреснения солёной воды для технологических целей и питьевого назначения. Выпаривание – высокоэнергоемкий процесс, требующий большого количества углеводородных ресурсов. Поиск путей энергосбережения в этой области является актуальным.

Ключевые слова: выпаривание, энергосбережение, ресурсосбережение, многокорпусная выпарная установка, выпарной аппарат.

Выпаривание – процесс повышения концентрации растворов, при котором жидкость переходит в газообразное состояние под воздействием тепла, с последующим уменьшением объёма жидкости. Так получают концентрированные продукты многих веществ, например, нитрата аммония, едкого натра, едкого калия и т. д. Этот метод используется также для выделения твёрдых компонентов из жидких смесей. Выпаривание применяется в пищевой, химической, фармацевтической и других отраслях промышленности.

Выпарная установка состоит из выпарного аппарата и вспомогательных устройств: теплообменника, конденсатора и т. п. Основные элементы выпарного аппарата – греющая камера, испарительная камера и сепаратор. В греющей камере растворы разогреваются до нужной температуры, в испарительной камере происходит кипение. Сепаратор обеспечивает отделение капель жидкости от пара. Также составляющими выпарных аппаратов являются устройства для циркуляции и транспортировки раствора.

Выпаривание производится на установках малой производительности, а также в аппаратах периодического действия при высокой депрессии. Вторичный пар в однокорпусных установках не используется, а просто удаляется. Простое выпаривание остаётся одним из самых распространённых методов концентрирования растворов благодаря своей простоте и универсальности.

Простое выпаривание может производиться непрерывным и периодическим методами. Определим материальный баланс при простом выпаривании:

$$G_n = G_k + W; G_n b_n = G_k b_k,$$

где G_n – количество раствора, поступившего в установку, G_k – количество раствора, получившегося после упаривания, b_n – концентрация раствора в начале процесса, b_k – конечная концентрация раствора.

Из равенств следует:

$$W = G_n (1 - b_n / b_k); b_k = G_n b_n / (G_n - W).$$

Эти выражения позволяют вычислить количество выпариваемой воды по заданным концентрациям раствора или рассчитать конечную концентрацию раствора по заданному количеству выпариваемой воды.

Тепловой баланс простого выпаривания определяется уравнением:

$$G_n c t_n + D h_{гп} = G_k c t_k + 0,01(Gb)_k \Delta q + W h_{вп} + D h_{кд} + Q_n,$$

где $гп$ – греющий пар, $вп$ – вторичный пар, $кд$ – конденсат, c – теплоёмкость раствора, t – температура, D – расход греющего пара, h – энтальпия, Δq – теплота разбавления раствора от конечной концентрации до начальной, Q_n – потери в окружающую среду.

Тепловой баланс позволяет оценить эффективность процесса выпаривания и определить необходимые параметры работы установки: мощность нагревателя, скорость подачи теплоносителя, возможные потери тепла.

Путём преобразований получается уравнение для вычисления общего расхода пара:

$$D = G_k \frac{(ct)_k - (ct)_n + 0,01 b_k \Delta q}{h_{гп} - h_{кд}} + W \frac{h_{вп} - (ct)_n}{h_{гп} - h_{кд}} + \frac{Q_n}{h_{гп} - h_{кд}}.$$

Отсюда следует, что общий расход пара определяется:

- расходом пара на изменение энтальпии раствора;
- расходом пара на образование вторичных паров;
- расходом пара на компенсацию потерь тепла в окружающую среду.

Поверхность нагрева выпарного аппарата определяют на основании уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{k \Delta t} = \frac{D(h_{гп} - h_{кд})}{k \Delta t},$$

где Q – количество теплоты, отдаваемое греющим паром раствору, k – коэффициент теплопередачи, Δt – полезная разность температур.

Полезная разность температур вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \Delta t_{об} - \sum \Delta,$$

где $\Delta_{об}$ – общая разность температур, $\sum \Delta$ – потери общей разности температур.

Общая разность температур определяется выражением:

$$\Delta t_{об} = t_{гп} - t_{вп}^{конд},$$

где $t_{гп}$ – температура греющего пара, поступающего в установку, $t_{вп}^{конд}$ – температура вторичного пара при входе в конденсатор.

Величина потерь общей разности температур определяется как сумма потерь за счёт физико-химической депрессии, потерь от гидростатического эффекта и гидравлических потерь.

При периодическом методе величины коэффициента теплопередачи и потерь общей разности температур являются переменными и зависят от концентрации. В этом случае они определяются как осредненные значения и вычисляются по формулам:

$$k_{\text{cp}} = \frac{1}{b_{\text{к}} - b_{\text{н}}} \times \int_{b_{\text{н}}}^{b_{\text{к}}} k \, db ;$$

$$(\Delta_1 + \Delta_2)_{\text{cp}} = \frac{1}{b_{\text{к}} - b_{\text{н}}} \times \int_{b_{\text{н}}}^{b_{\text{к}}} (\Delta_1 + \Delta_2) \, db.$$

Для простого выпаривания применяются различные выпарные аппараты: с естественной циркуляцией, с принудительной циркуляцией, с плёночным движением раствора и т. д.

Одним из направлений повышения эффективности выпаривания является эксплуатация многокорпусных выпарных установок [1].

Многокорпусные выпарные установки применяются для выпаривания раствора NaNO_3 в химической промышленности, чтобы получить высококонцентрированные растворы, а также практически сухие кристаллические продукты. В таком виде облегчается транспортировка и хранение вещества. Концентрирование водного раствора NH_4NO_3 , необходимого для производства аммиачной селитры, распространённого вида удобрений, применяемых в сельском хозяйстве, также возможно проводить в многокорпусных выпарных аппаратах. Раствор аммиачной селитры упаривается, позволяя улучшить качество удобрения, снижая в нем содержание воды до 0,3 %. Также многокорпусные выпарные установки применяются для опреснения солёной воды. Однако обессоливание воды в промышленном масштабе на сегодняшний день оставляет высокий углеродный след и оптимально только с применением зелёных технологий, например, мембранная дистилляция с применением солнечной энергии [2].

Многokратное выпаривание с регенерацией теплоты в целом приводит к повышению эффективности работы установки. Но, при выполнении теплового расчёта многокорпусных установок для растворов NaNO_3 и NH_4NO_3 с разными исходными данными была обнаружена закономерность, что общая площадь испарительной поверхности в многокорпусной установке увеличивается. Данные, иллюстрирующие повышение общей площади испарительной поверхности трех корпусов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет параметров 3-х корпусной выпарной установки

	NaNO_3					NH_4NO_3
D_1 , кг/ч	1169,162	1567,573	1728,033	1795,705	1905,533	1452,995
D_2 , кг/ч	1114,862	1506,52	1659,757	1734,22	1809,448	1397,605
D_3 , кг/ч	1163,601	1587,602	1796,512	1870,081	2016,022	1490,914
Q_1 , кДж/ч	2463858	3303458	3641607	3784217	4015665	3103751
Q_2 , кДж/ч	2411820	3253447	3582094	3741255	3903354	3050414
Q_3 , кДж/ч	2578179	3521795	3982474	4143445	4465950	3337174
F_1 , м ²	30	42	56	67	92	61
F_2 , м ²	30	42	56	66	90	58
F_3 , м ²	34	51	65	77	105	61
ϑ_3 , °C	77,168	77,126	76,764	77,127	77,127	60,67

Где, D_1, D_2, D_3 – расходы пара по корпусам, кг/ч; Q_1, Q_2, Q_3 – количество тепла, передаваемого через поверхность корпуса, кДж/ч; F_1, F_2, F_3 – площади корпусов, м²; ϑ_3 – температура вторичного пара в третьем корпусе, °C.

На основании расчётов многокорпусных установок можно сделать вывод, что несмотря на то, что её эксплуатация приведёт к ощутимой экономии греющего пара, составляющей порядка 5–15 %, а следовательно, к экономии топливно-энергетических ресурсов, применять их можно, только если позволяют технологические площади, т. к. суммарная площадь испарительной поверхности растёт. Так как процесс простого выпаривания является высокоэнергоёмким,

то особое внимание в мировой промышленности уделяется переходу на возобновляемые источники энергии [3–5].

Список использованных источников

1. Аванесов, В. М., Диданов М. Ц., Щеренко А. П. «Энергосберегающие технологии в организации работы многокорпусных выпарных установок». Журнал «Энергобезопасность и энергосбережение», 2017, № 4. – С. 39–42.
2. Elhenawy, Y. Moustafa, G. H., Bassyouni, M. Performance enhancement of a hybrid multi effect evaporation/membrane distillation system driven by solar energy for desalination. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022, DOI: 10.1016/j.jece.2022.108855.
3. Mahjoob Karambasti B. Ghodrat M., Behnia M. and others. Design methodology and multi-objective optimization of small-scale power-water production based on integration of Stirling engine and multi-effect evaporation desalination system. Desalination. 2022, DOI: 10.1016/j.desal.2021.115542/
4. Wang Y. Morosuk T., Cao W. and others. A high-efficiency multi-function system based on thermal desalination and absorption cycle for water, water-cooling or water-heating production. Energy Conversion and Management (2023), DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116962.
5. Liu H. Joseph A., Sharshir S. W. and others. Recent advances in heat pump-coupled desalination systems: A systematic review. Desalination. 2022, DOI: doi: 10.1016/j.desal.2022.116081.

УДК 621.182

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ ТИПА ПТВМ

Агафонова И. В., к.т.н., доц., Боровицкая М. В., студ.

Российский университет транспорта, г. Москва, Российская федерация

Реферат. В условиях роста цен, ограниченности топливных ресурсов и ужесточения экологических требований к воздействию выбросов от теплогенерирующих установок на окружающую среду вопросы ресурсосбережения становятся как никогда актуальны. Анализ состояния котельных ЖКХ показал, что наблюдается снижение КПД котлов в городских котельных. Модернизация действующих котлов малой и средней мощности на порядок дешевле, чем их полная замена, т. к. не требуется значительных инвестиционных затрат. Она может быть выполнена в короткий срок, что значительно сокращает себестоимость производимой тепловой энергии. В статье приводится перечень мер по модернизации водогрейных котельных, а также оценка эффективности модернизации котельной с котлами типа ПТВМ путем установки контактных теплообменников, выполненная на основании теплотехнического расчета.

Ключевые слова: водогрейная котельная, модернизация водогрейной котельной, энергоэффективность, ресурсосбережение, конденсационный теплоутилизатор, контактный теплообменник.

Развитие промышленности сопровождается ростом потребления топливно-энергетических ресурсов для выработки энергии. Наиболее энергоемкими секторами являются «Электроэнергетика, производство тепловой энергии» (27,4 %), «Обрабатывающая промышленность» (20 %), «Население» (17,2 %) и «Транспорт» (15,2 %) [1]. На сегодняшний день в коммунальном хозяйстве срок эксплуатации 57 % котельных превышает 20 лет, 40 % котельных эксплуатирует котлы с КПД менее 82 %. Срок эксплуатации более 20 лет имеют 10800 котлов. Нуждается в замене и не подлежит модернизации 14 тыс. малых котлов мощностью до 1 МВт.

Можно предложить следующие направления для повышения энергоэффективности водогрейных котлов.

1. Обновление моделей котлов, а также схем компоновки оборудования с отключаемыми и групповыми экономайзерами.