

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

$$t_n \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left( \left( \frac{\bar{U}}{\bar{U}_{kp}} \right)^{1.28} \right)^{0.43}; \quad (9)$$
$$t_n \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left( \frac{\bar{U}}{\bar{U}_{kp}} \right)^{0.55}.$$

#### 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

Александрийская 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 орошения солёной воды для технологических целей и питьевого назначения. Выпаривание – высокозергоемкий 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:

$$G_h = G_k + W; G_h b_h = G_k b_k,$$

где  $G_h$  – количество раствора, поступившего в установку,  $G_k$  – количество раствора, получившегося после упаривания,  $b_h$  – концентрация раствора в начале процесса,  $b_k$  – конечная концентрация раствора.

Из равенств следует:

$$W = G_h (1 - b_h / b_k); b_k = G_h b_h / (G_h - W).$$

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:

$$G_c t_{\text{пп}} + D h_{\text{вп}} = G_c t_{\text{kд}} + 0,01(Gb)_k \Delta q + Wh_{\text{вп}} + Dh_{\text{kд}} + Q_n,$$

где  $\text{пп}$  – греющий пар,  $\text{вп}$  – вторичный пар,  $\text{kд}$  – конденсат,  $c$  – теплоёмкость раствора,  $t$  – температура,  $D$  – расход греющего пара,  $h$  – энталпия,  $\Delta q$  – 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:

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

Отсюда следует, что общий расход пара определяется:

- расходом пара на изменение энталпии 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:

$$F = \frac{Q}{k \Delta t} = \frac{D(h_{\text{пп}} - h_{\text{kд}})}{k \Delta t},$$

где  $Q$  – количество теплоты, отдаваемое греющим паром раствору,  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\Delta t$  – полезная разность температур.

Полезная разность температур вычисляется по формуле:

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

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

Общая разность температур определяется выражением:

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

где  $t_{\text{пп}}$  – температура греющего пара, поступающего в установку,  $t_{\text{вп}}^{\text{конд}}$  – 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:

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

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

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  $\text{NaNO}_3$  в химической промышленности, чтобы получить высококонцентрированные растворы, а также практически сухие кристаллические продукты. В таком виде облегчается транспортировка и хранение вещества. Концентрирование водного раствора  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 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 ороснения солёной воды. Однако обессоливание воды в промышленном масштабе на сегодняшний день оставляет высокий углеродный след и оптимально только с применением зелёных технологий, например, мембранный дистилляция с применением солнечной энергии [2].

Многократное выпаривание с регенерацией теплоты в целом приводит к повышению эффективности работы установки. Но, при выполнении теплового расчёта многокорпусных установок для растворов  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  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

	$\text{NaNO}_3$					$\text{NH}_4\text{NO}_3$
$D_1$ , 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 <sup>2</sup>	30	42	56	67	92	61
$F_2$ , м <sup>2</sup>	30	42	56	66	90	58
$F_3$ , м <sup>2</sup>	34	51	65	77	105	61
$\vartheta_3$ , °С	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, м<sup>2</sup>;  $\vartheta_3$  – температура вторичного пара в третьем корпусе, °С.

На основании расчётов многокорпусных установок можно сделать вывод, что несмотря на то, что её эксплуатация приведёт к ощущимой 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 Karambasi 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.