

Рисунок 1

area is presented. The dependence for defining the quantity of energy produced by a wind installation in different wind conditions is offered.

Используя вышеприведенную методику, можно судить о размере выработки энергии конкретной ветроустановки для определенных ветровых условий в течении заданного периода времени.

## SUMMARY

The method of obtaining the value of annual energy produced by wind installation taking into account the most energy-contained range of wind speed. The calculation is based on the Reley distribution. The example of calculation of energy produced by the 3-kWt wind installation for the conditions in Sumy

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васью П.Ф. Электромеханическая система мощной ветроустановки / Третья международная научно-практическая конференция по возобновляемым электромеханическим и электрическим системам. - Алушта, Крым, 19-21 сентября, 1997.
2. Дж. Твайделл, А. Уэйр. Возобновляемые источники энергии. - Москва: Энергоатомиздат, 1990. - 391с.
3. Коваленко В.М. Возможность и эффективность использования энергии ветра в условиях Сумской области // Энергетика и электрификация, 1999. - № 1. - С. 45-49.

Поступила в редколлегию 15 января 1999 г.

УДК 66.065.58

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ В ПРОЦЕССАХ ВЫСАЛИВАЮЩЕЙ И ИСПАРИТЕЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

А.П.Врагов, проф.; А.В.Гайковой, асп.

Ряд преимуществ, таких, как высокая степень извлечения растворенного вещества, возможность управлять процессом посредством изменения пересыщения и получать вещества высокой химической чистоты, обусловил применение высаливающей кристаллизации (ВК) в химической, химико-фармацевтической и других отраслях промышленности [1,2]. Основные рекомендации по выбору растворителя в качестве высаливающего агента приведены в литературе [1,3]. Наиболее широкое использование для ВК получили метиловый, этиловый и изопропиловый спирты, а также ацетон [1-4]. В то же время из-за высокой стоимости органических растворителей, необходимости их регенерации, связанной с энергетическими затратами и

некоторой потерей высаливателя, ВК не получила широкого распространения как способ массовой кристаллизации минеральных солей.

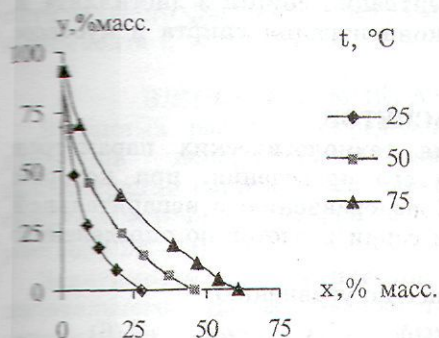
Несмотря на то, что органический высаливатель гораздо дороже, чем получаемые неорганические продукты, в литературе имеются сведения об экономической эффективности применения ВК. В работе [1] приведены сведения об эффективности получения несодержащих железа квасцов из водных растворов необогащенных квасцов путем применения этилового спирта в качестве высаливателя. Известен также метод получения сульфата калия из мирабилита с использованием жидкого органического высаливателя, который регенерируют в дистилляционной колонне, при этом указывается, что стоимость производства сульфата калия высаливанием значительно ниже, чем способом испарительной кристаллизации (ИК) [5].

Анализ литературных данных показал, что вопрос об эффективности ВК в отношении энергетических затрат по получению неорганических солей методами высаливания и выпаривания изучен недостаточно.

В данной работе рассчитаны и проанализированы энергетические затраты (ЭЗ) на проведение кристаллизации нитрата калия методами ИК и ВК, а также оценено влияние технологических параметров процесса ВК на энергетические затраты.

### ПРОЦЕСС ВК НИТРАТА КАЛИЯ

Для оценки ЭЗ в процессе ВК в качестве модельной взята система нитрат калия - этиловый спирт - вода, данные по растворимости  $KNO_3$  даны в [7] и представлены на тройной диаграмме в прямоугольной системе координат в виде изотерм (рис. 1).



Для целей математического моделирования и использования ЭВМ в расчетах процесса ВК данные по растворимости нитрата калия в водно-этанольном растворе обобщены системой уравнений:

$$x = K + A.y + B.y^2 + C.y^3 + D.y^4, \quad (1)$$

$$A = a_3 + a_1.t + a_2.t^2, \quad (2)$$

$$B = b_3 + b_1.t + b_2.t^2, \quad (3)$$

$$C = c_3 + c_1.t + c_2.t^2, \quad (4)$$

$$D = d_3 + d_1.t + d_2.t^2, \quad (5)$$

Рисунок 1. Растворимость нитрата калия в водно-этанольном растворе в зависимости от температуры

где  $x, y$  - содержание в растворе растворенного вещества и высаливателя соответственно, доли масс.;  $K$  - растворимость соли в водном растворе, доли масс.;  $t$  - температура,  $^\circ C$ ;  $A, B, C, D, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3$  - коэффициенты регрессий.

На основании совместного решения уравнений (1) - (5), описывающих растворимость соли в трехкомпонентной системе, уравнений материального и теплового балансов разработана математическая модель, описывающая взаимосвязь макропараметров процесса ВК. По разработанной программе на ЭВМ определяется выход кристаллического продукта, расход высаливателя и маточного раствора, состав и температура маточника в зависимости от

расхода питательного раствора, его концентрации и температуры, состава и температуры высаливателя.

Рассчитанные параметры являются исходным для оценки ЭЗ на проведение процессов ИК, ВК и ректификации этилового спирта из маточных растворов.

В качестве испарительного кристаллизатора, энергетические затраты которого сравнивались с энергетическими затратами процесса ВК, принят кристаллизатор со взвешенным слоем типа «Кристалл». Этот тип кристаллизатора нашел широкое применение в промышленности [2,6]. Основные закономерности и порядок расчета материальных и тепловых потоков испарительной кристаллизационной установки приведен в литературе [6]. Для регенерации органического растворителя с целью его возврата на стадию ВК выбрана ректификационная колонна непрерывного действия с колпачковыми тарелками.

С помощью составленной программы расчета на ЭВМ определяются: а) для процесса ИК - расход соковых паров, выход маточного раствора и количество теплоты, необходимое для проведения процесса в зависимости от производительности кристаллизатора, концентрации и температуры питательного раствора; б) для процесса ректификации - расходы дистиллята и кубового остатка, расход теплоты в подогревателе исходной смеси и кубе-испарителе в зависимости от расхода и состава исходной смеси, составов дистиллята и кубового остатка.

Для расчетов приняты начальные условия и допущения: а) состав и температура питательного раствора, а также производительность ИК и ВК принимаются одинаковыми; б) процессы испарительной кристаллизации и ректификации проводятся под атмосферным давлением и без учета тепловых потерь, поскольку они соизмеримы; в) концентрация спирта в дистилляте и высаливателе принимается одинаковой; г) концентрация спирта в кубовом остатке принимается равной 3 % масс.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

С целью установления степени влияния технологических параметров процесса и поиска оптимального варианта его проведения, при котором кристаллизация нитрата калия методом ВК по сравнению с испарительной энергетически более выгодна, проведены три серии расчетов по определению энергетической эффективности процесса ВК.

Энергетическая эффективность определялась по уравнению

$$\text{Э} = (Q_v - Q_r) \cdot 100 / Q_v, \quad (6)$$

где  $Q_v$  и  $Q_r$  - тепловой поток на проведение испарительной кристаллизации и регенерации растворителя соответственно, кВт.

Расход теплоты на проведение ИК определяется по зависимости

$$Q_v = G_k (c_{кр} t_{кр} - c_{ур} t_{ур} - \Delta q_k) + W_{сн} (H_{сн} - c_{ур} t_{ур}) + G_{мр} (c_{мр} t_{мр} - c_{ур} t_{ур}), \quad (7)$$

где  $G_k$ ,  $W_{сн}$ ,  $G_{мр}$  - выход кристаллов, расход соковых паров и маточного раствора соответственно, кг/с;  $c_{кр}$ ,  $c_{ур}$ ,  $c_{мр}$  - теплоемкости кристаллов, питательного и маточного растворов соответственно, кДж/(кг·К);  $H_{сн}$  - энтальпия сокового пара, кДж/кг;  $\Delta q_k$  - теплота кристаллизации, кДж/кг;  $t_{кр}$ ,  $t_{ур}$ ,  $t_{мр}$  - температура кристаллов, питательного и маточного растворов соответственно, °С.

Тепловой поток, затрачиваемый на стадии ректификации на регенерацию растворителя из маточного раствора, полученного в результате ВК, равен

$$Qr = G_D[(1 + R)r_D + c_D t_D] + G_W c_W t_W - G_F c_F t_{нач}, \quad (8)$$

где  $G_D$ ,  $G_W$ ,  $G_F$  – расход дистиллята, кубового остатка и питательного раствора соответственно, кг/с;  $R$  – оптимальное флегмовое число;  $r_D$  – удельная теплота конденсации высаливателя, кДж/кг;  $c_W$ ,  $c_F$  – теплоемкость кубового остатка и питательного раствора соответственно, кДж/(кг·К);  $t_D$ ,  $t_W$ ,  $t_{нач}$  – температура дистиллята, кубового остатка и начальная питательного раствора соответственно, °С.

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СПИРТА В ВЫСАЛИВАТЕЛЕ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ

Исходными данными в этих расчетах являлись: расход питательного раствора (0,5 кг/с) и температура высаливателя (25°С), которые не изменялись во всех трех сериях расчетов; температура питательного раствора (25°С); концентрация спирта в маточном растворе (20 % масс.). Значения величин ЭЗ, необходимых для проведения процессов ИК и ректификации, приведены в таблице 1.

Из графически представленной зависимости энергетической эффективности от концентрации спирта в высаливателе (см. рис. 2) установлено, что существует экстремум, соответствующий максимальной энергетической эффективности процесса ВК, которая составляет 24,5 % при концентрации спирта в высаливателе 85 % масс. Это можно объяснить тем, что, с одной стороны, увеличение концентрации спирта в высаливателе приводит к увеличению выхода кристаллического продукта и уменьшению расхода регенерируемого маточного раствора, а с другой, – к повышению энергетических затрат процесса ректификации вследствие увеличения оптимального флегмового числа при увеличении концентрации легколетучего компонента в дистилляте.

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПИТАТЕЛЬНОГО РАСТВОРА

В данных расчетах определены энергетические затраты на проведение процессов испарительной кристаллизации и ректификации при концентрации спирта в высаливателе 85 % масс. (см. табл. 2), концентрации спирта в маточном растворе 20 % масс. в диапазоне температур питательного раствора 20 - 60 °С.

Зависимость энергетической эффективности ВК от температуры питательного раствора представлена на рис.3. Сложный характер зависимости может быть объяснен тем, что изменение температуры питательного раствора влияет на материальные и тепловые потоки процессов ВК, испарительной кристаллизации и ректификации. Так, с увеличением температуры питательного раствора уменьшаются энергетические затраты при выпаривании и ректификации на подогрев потоков до температуры начала фазового перехода. С другой стороны, увеличение температуры питательного раствора приводит к увеличению равновесной концентрации кристаллизующей соли в маточном растворе как для процесса ВК, так и для испарительной кристаллизации и, следовательно, к снижению выхода кристаллов.

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СПИРТА В МАТОЧНОМ РАСТВОРЕ

Рассчитанные энергетические затраты на проведение процессов испарительной кристаллизации и ректификации в зависимости от концентрации спирта в маточном растворе представлены в таблице 3.

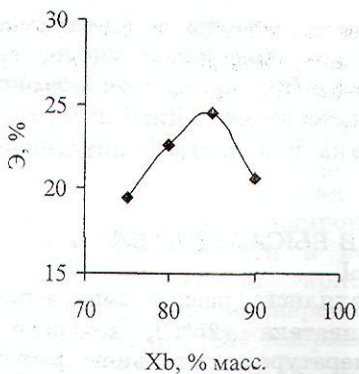


Рисунок 2 – Зависимость энергетической эффективности (Э) от концентрации спирта в высаливателе (Xb)

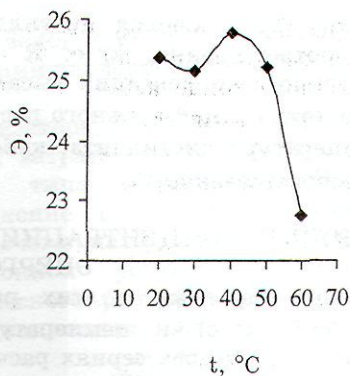


Рисунок 3 – Зависимость энергетической эффективности (Э) от температуры питательного раствора (t)

Таблица 1 – Энергетические затраты на проведение процессов ВК и ИК в зависимости от концентрации спирта в высаливателе

Xb, % масс.	Qv, кВт	Qr, кВт
75	739,1	595,2
80	756,2	585,3
85	771,2	582,1
90	784,1	622,6

Таблица 2 – Энергетические затраты на проведение процессов ВК и ИК в зависимости от температуры питательного раствора

t, °C	Qv, кВт	Qr, кВт
20	824,0	615,0
30	731,2	547,3
40	649,2	481,8
50	565,8	423,2
60	483,5	373,4

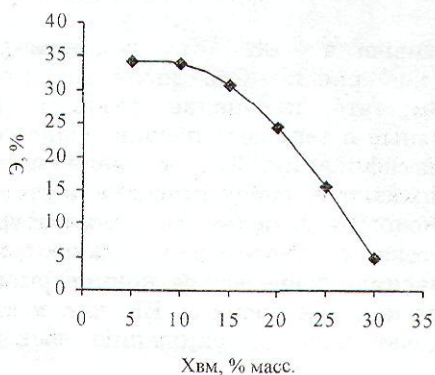


Рисунок 4 – Зависимость энергетической эффективности (Э) от концентрации спирта в маточном растворе (Xвм)

Таблица 3 – Энергетические затраты на проведение процессов ВК и ИК в зависимости от концентрации спирта в маточном растворе

Xвм, % масс.	Qv, кВт	Qr, кВт
5	371,1	244,2
10	482,8	318,3
15	574,2	397,4
20	649,5	490,5
25	711,1	600,8
30	762,5	724,1

Расчет ВК проведен для температуры питательного раствора 40°C и концентрации спирта в высаливателе 85 % масс.

Понижение энергетической эффективности от концентрации спирта в маточном растворе (рис. 4) объясняется тем, что с повышением концентрации спирта, несмотря на увеличение степени извлечения и выхода кристаллов, возрастает как расход маточного раствора, так и расход дистиллята, при этом возрастают и энергетические затраты.

Из проведенных исследований можно заключить, что эффективность ВК в значительной мере определяется физико-химическими свойствами как получаемого кристаллического продукта, так и применяемого органического высаливателя, а также зависит от технологических параметров процесса, оптимизация которых представляет собой сложную задачу. С точки зрения энергетической эффективности получения неорганических солей методом высаливания целесообразно в качестве высаливателя использовать разбавленные спирты, а оптимальное содержание спирта в маточном растворе должно находиться в диапазоне концентраций 5 - 30 % масс.

### ВЫВОДЫ

Установлено, что преобладающее влияние на энергетическую эффективность процесса ВК нитрата калия из водноэтанольных растворов оказывают концентрация спирта в маточном растворе и высаливателе. Максимальное значение энергетической эффективности ВК нитрата калия по сравнению с испарительной кристаллизацией 34,2% достигается при температуре питательного раствора 40°C, концентрации спирта в высаливателе 85% масс. и концентрации спирта в маточном растворе 5% масс.

Для диапазона концентраций спирта в маточном растворе от 5 до 25% масс. процесс ВК нитрата калия энергетически более выгоден, чем процесс испарительной кристаллизации. Малое содержание спирта в маточном растворе приводит к низким значениям степени извлечения растворенного вещества и выхода кристаллов, а следовательно, к необходимости возврата кубового остатка из ректификационной колонны на стадию насыщения.

Учитывая физико-химические свойства и условия получения солей, метод ВК может быть использован как способ, альтернативный способу ИК.

### SUMMARY

*The power expenses and the influence of technological parameters of process reception  $KNO_3$  by methods evaporative and salting-out crystallization are computed and analysed.*

*Taking into account physical and chemical properties and conditions of reception of salts, the method of salting-out crystallization can be used as a way alternative to evaporative crystallization.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маллин Дж. У. Кристаллизация / Пер. с англ. В.Н. Вигдоровича. - М.: Металлургия, 1965.- 342 с.
2. Митусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. - М.: Химия, 1968.- 304 с.
3. Фельдман Ю.Я. Растворитель как средство управления химическим процессом. - Л.: Химия, 1990.- 240 с.
4. Полян М.Е. Технология минеральных солей. - М.: Госхимиздат, 1961.
5. Шихеева Л.В., Зырянов В.В. Сульфат натрия. Свойство и производство. - Л.: Химия, 1978.
6. Брагов А.П. Классифицирующие кристаллизаторы. - Киев: ИСМО, 1998. - 202 с.
7. Боган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. Справочник по растворимости: В 3 т. - М., Л.: Изд-во АН СССР, 1961.

Поступила в редколлегию 11 октября 1999 г.