

из “полутруб”. Согласно (1) толщины стенок наружного  $\delta_{\text{нар}}$  и внутреннего  $\delta_{\text{вн}}$  полуколец должны быть

$$\delta_{\text{нар}} = 2\delta_2, \quad \delta_{\text{вн}} = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{6}}\right)\delta_2 = 1,18\delta_2,$$

и, учитывая (5) и что  $R_0 \approx d_2$ , материалоемкость превысит исходное значение в

$$\frac{2\pi R_0 \delta_{\text{нар}} + 2\pi(R_0 - d_{k12})\delta_{\text{вн}}}{2\pi d_2 \delta_2} = 2,7 \text{ раза.}$$

Последние подсчеты еще раз подтверждают оптимальность конструкции на основе двенадцатитрубной схемы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Системы тепловых насосов*. Инструкция по проектированию. Vissmann – 2000. – 47с.

Получено 27.08.2005 г.

УДК 663.5:541.48:66.048

БРЕМЕРС Г.<sup>1</sup>, ШКЕЛЕ А.<sup>1</sup>, БИРЗИЕТИС Г.<sup>1</sup>, ГУЛБИС В.<sup>1</sup>, ДАНИЛЕВИЧ А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт силовых машин Латвийского сельскохозяйственного университета*

<sup>2</sup> *Институт Микробиологии и биотехнологии Латвийского Университета*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БЕЗФЛЕГМОВОЙ СОЛЕВОЙ ПЕРЕГОНКИ СПИРТА

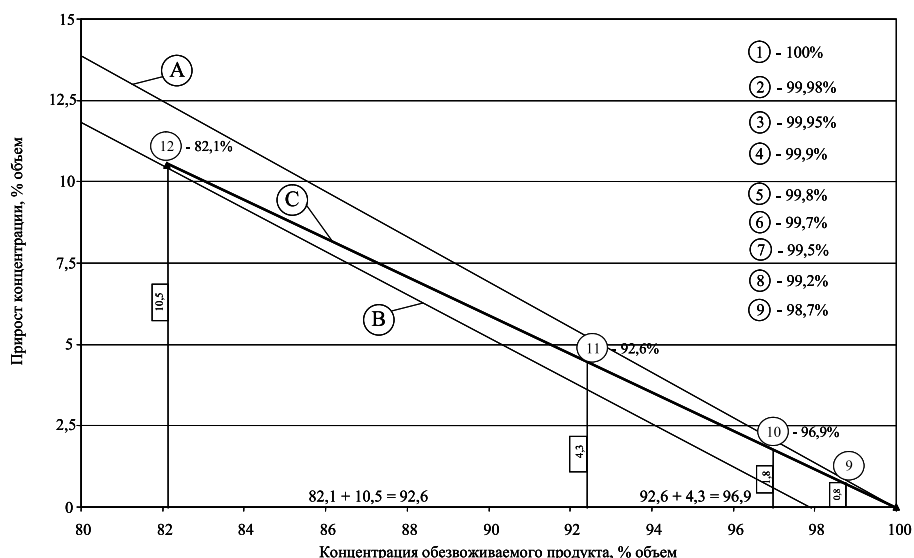
Описано принцип работы обладнання для зміцнення пари спирту шляхом перегонки з використанням водопоглинальної солі без утворення флегми та принцип регенерації солі. Пропонований спосіб дає змогу одержувати безводний спирт для використання у виробництві біопального та у порівнянні з традиційною перегонкою майже вдвічі зменшити витрату енергії на процес.

Описан принцип работы устройства для укрепления паров спирта путем перегонки с использованием водопоглощающей соли без образования флегмы и принцип регенерации соли. Предлагаемый способ дает возможность получить безводный спирт для использования в производстве биогорючего и по сравнению с традиционной перегонкой почти вдвое снизить расход энергии на процесс.

The operation principle of equipment for alcohol dehydration using non-reflux saline distillation is described. The new method for saline regeneration is developed. The developed innovative non-reflux saline dehydration method of crude alcohol gives possibility to obtain absolute alcohol for biofuel production and reduce energy consumption in dehydration process almost on half.

Все исследователи солевой перегонки спирта указывают на преимущества этого вида перегонки. Такая перегонка дает возможность получить продукт концентрацией выше азеотропной вплоть до абсолютного спирта, и сэкономив энергию перегонки [1–6]. Однако этот метод имеет и недостатки, главная из них – регенерация отработанной соли. Предлагают отработанный раствор соли упаривать, соль кристаллизовать и сушить. При этом регенерированная соль возвращается в колонну перегонки в виде раствора во флегме. Таким методом пользовались и авторы

настоящей статьи. Получение спирта высокой концентрации в результате перегонки с добавлением хлорида кальция, связано с трудностями регенерации соли. Главные из них проявлялись после кристаллизации, когда нужно было отнять от соли кристаллизационную воду путем сушки. Для этого нужна высокая температура. Моногидрат хлорида кальция при такой температуре сушки расплавляется, образуя комки и слои частиц, прочно сцепленных с поверхностью аппаратуры. Это затрудняет подвод теплоты, перемешивание и транспортировку соли.



**Рис. 1. Определение теоретического числа тарелок в абсорбирующей воду части концентрационной колонны.**

⑫ — номер тарелки;  $\boxed{10,5}$  — прирост концентрации на тарелке;

*A* — линия изменения концентрации этанола в присутствии безводных кристаллов  $\text{CaCl}_2$ ;

*B* — линия изменения концентрации этанола в присутствии насыщенного водного раствора  $\text{CaCl}_2$ ;

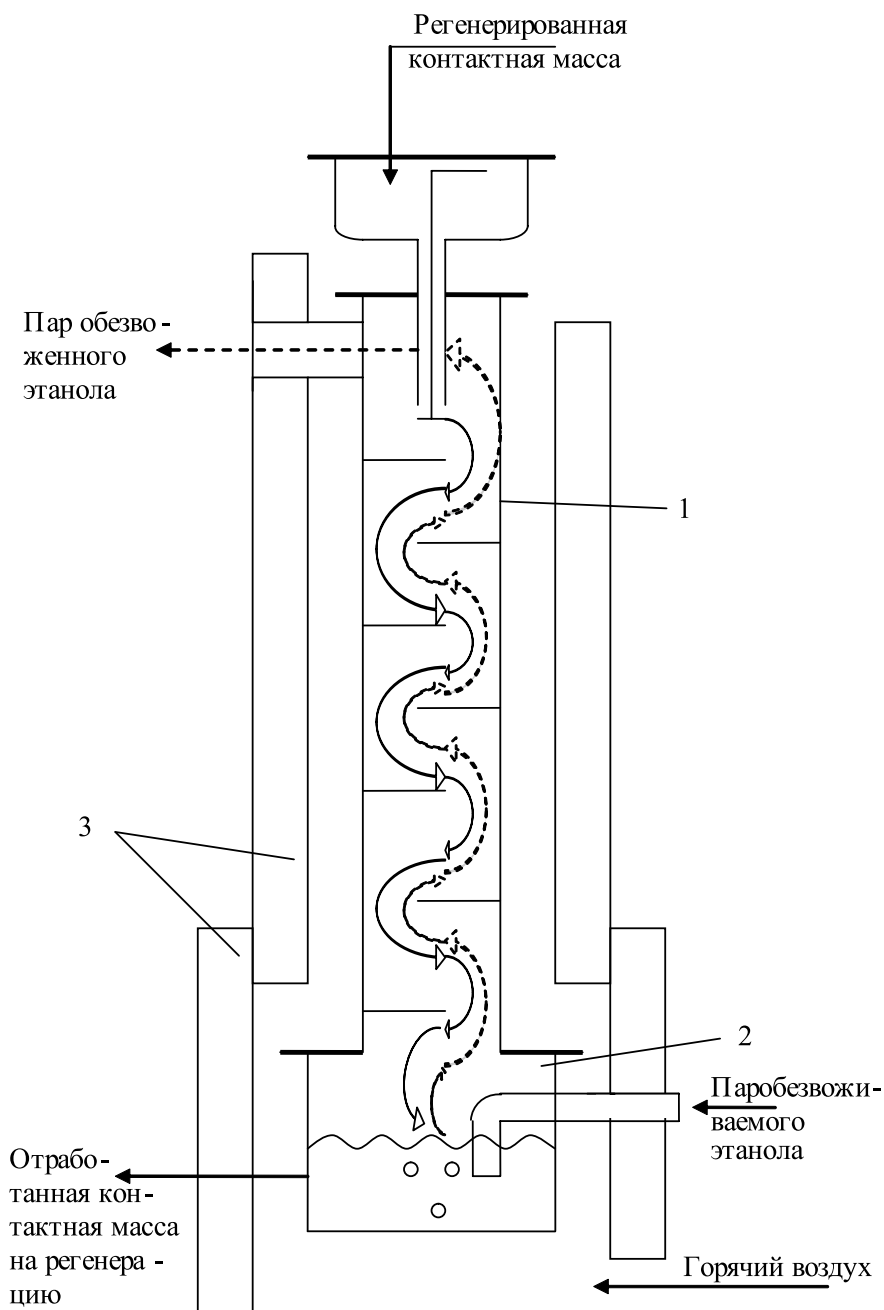
*C* — линия изменения концентрации этанола при переходе безводного  $\text{CaCl}_2$  в насыщенный водной раствор — рабочая линия.

Для устранения этих трудностей целесообразно регенерацию соли проводить не в воздушной среде, а в химически инертной вязкой жидкости. Важным условием при этом является то, что жидкость без существенных изменений должна выдерживать весьма высокую температуру регенерации соли, которая должна быть равна или выше температуры, при которой кристаллогидрат теряет химически связанную воду. Все этапы регенерации соли — упаривание, кристаллизация и сушка происходят в одном агрегате — регенераторе при температуре регенерации соли, которая для хлористого кальция составляет около  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . В таких условиях образуется суспензия мелких безводных кристаллов в жидкости. Жидкость препятствует столкновениям кристаллов друг с другом, что предотвращает образование конгломератов соли и осаждение их на внутренних поверхностях оборудования с образованием слоя похожего на накипь.

Направление полученной суспензии в перегонный аппарат вместо сухой соли повлекло изменение самой технологии перегонки. Существующая технология предусматривает растворение соли во флегме. Но для образования флегмы тратится энер-

гия, которую можно сэкономить, если вместо флегмы в верхнюю часть колонны насосом вводить контактную массу, в виде суспензии безводных кристаллов соли в разделяющей их жидкой среде. Контактная масса, стекая по тарелкам вниз, встречается и контактирует с парами этанола, поднимающимися вверх. При этом соль связывает воду паров спирта, сначала образуя кристаллогидраты, потом насыщенный раствор, который затем разбавляется. Положительный эффект обезвоживания обуславливается двумя факторами: отнятием воды от спирто-водной смеси при образовании кристаллогидратов и изменением соотношения парциальных давлений паров спирта и воды на каждой тарелке колонны в желательном направлении.

В своих исследованиях, имитируя ступенчатые изменения концентрации спирта на тарелках колонны, мы создали диаграмму для определения числа теоретических тарелок в верхней части колонны безфлегмовой перегонки (Рис.1). Линия A показывает изменение концентрации спирта на тарелках в зависимости от концентрации перегоняемого спирта в присутствии безводных кристаллов соли. Линия B показывает изменение концентрации спирта на та-

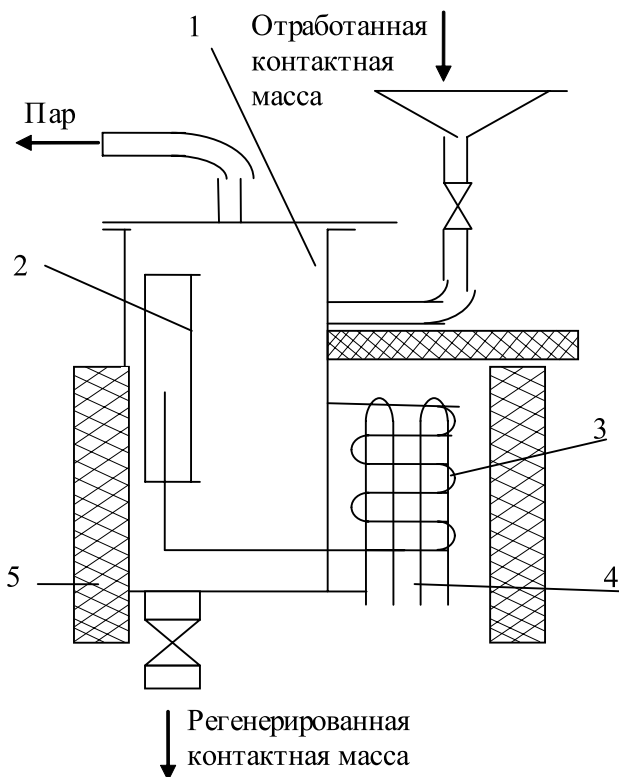


**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки для обезвоживания этанола.  
 1 – колонна с тарелками; 2 – куб; 3 – термоизоляционный кожух.

релках в зависимости от концентрации перегоняемого спирта в присутствии насыщенного раствора соли. Переход от сухого, безводного состояния кристаллов к состоянию насыщенного раствора в верхней части колонны происходит постепенно и отражается рабочей линией С. Длина вертикали, проведенной из любой точки абсциссы, на которой отложены концентрации спирта на различных тарелках колонны до рабочей линии, показывает уве-

личение концентрации этанола в ближайшей следующей по ходу подъема паров этанола зоне (тарелке) колонны. Нумерация тарелок предлагается сверху вниз.

Метод концентрирования спирта, который можно назвать безфлегмовой солевой перегонкой, мы исследовали как на лабораторной, так и на специально изготовленной малогабаритной установке. Эта установка состоит из колонны



**Рис. 3. Схема установки для регенерации соли.**  
**1 – цилиндрический приемник; 2 – декантатор; 3 – теплообменник;**  
**4 – электронагреватель; 5 – теплоизоляционный кожух.**

для обезвоживания спирта и из узла регенерации соли. Устройство колонны обезвоживания показано на рис. 2.

Принцип действия этой колонны следующий. В находящуюся в кубе колонны отработанную контактную массу (разделяющую среду, поглощающую соль, отобранную от спирта воду, некоторое количество этанола) вводят подлежащие обезвоживанию пары спирта. Они барботируют через жидкость и поднимаются вверх по колонне. Навстречу им по полкам (тарелкам) стекает горячая регенерированная контактная масса (разделяющая среда и водопоглощающая соль). Оба потока контактируют друг с другом. В результате тепломассообмена между этими потоками водопоглощающая соль отнимает от пара воду, образуя кристаллогидраты все возрастающей по мере приближения к кубу степени оводнения. С первой (сверху) полки (тарелки) из колонны уходит обезвоженный пар спирта, в куб поступает практически истощившая свою способность водопоглощения контактная масса, так как за время ее

контакта с водно-спиртовым паром соль образовала насыщенный раствор и больше поглощать воду не может. Эта масса выводится из аппарата и направляется на регенерацию.

Узел регенерации соли работает следующим образом. Цилиндрическая емкость установки (рис. 3) заливается контактной массой несколько выше уровня входа ее в теплообменник 3. В результате змеевик теплообменника заполняется контактной массой. В змеевике масса нагревается и возникает ее естественная циркуляция. Нагретая масса течет по змеевику вверх и поступает в цилиндр, где смешивается с вновь поступающей на регенерацию контактной массой, повышая ее температуру. Так, постепенно нагреваясь до соответствующей температуры кристаллогидраты соли теряют гидратную воду вплоть до полного обезвоживания и восстановления своей водопоглотительной способности. Выпаренная вода удаляется из аппарата в виде пара, а регенерированная масса выводится через патрубок в нижней части установки. В качестве

Таблица. Сравнение расхода энергии при производстве абсолютного спирта, в %

Статьи расхода энергии	В стандартном комплекте с применением флегмы и с молекулярным ситом	В безфлегмовой солевой перегонке
С паром готового продукта	9,1	9,1
С охлаждающей водой в дефлегматоре, т.е. для образования флегмы	53,7	-
С бардой	30,9	30,9
С лютерной водой	1,1	-
Для регенерации солей	-	6,7
Потери	5,2	4,5
Всего	100,0	51,2

разделяющей среды в опытах использовались минеральное масло, рапсовое масло, парафин. Последний оказался более приемлемым, т.к. более устойчив к длительному воздействию высоких температур, почти не пенится, не дымит и не образует летучих фракций. В качестве водопоглощающей соли использовали хлористый кальций. Для регенерации контактной массы парафин – хлористый кальций контактную массу нагревали до 180...210 °С с помощью электронагревателей.

Данные, полученные в этих исследованиях, дают возможность произвести энергетический расчет. В расчете сравнивается получение абсолютного спирта в стандартном комплекте: бражная колонна, ректификационная колонна, молекулярное сито и в безфлегмовой солевой установке, состоящей из бражной колонны, безфлегмовой солевой колонны и узла регенерации соли. Расчет произведен по методике [7] с использованием численных значений расходных величин, указанных в этом же источнике. Сравнительные цифры показаны в таблице.

Данные таблицы показывают, что при использовании безфлегмово – солевой перегонки, вместо стандартной для производства абсолютного спирта, можно сэкономить почти половину расходуемой энергии.

В настоящее время изготовлена пилотная установка, при помощи которой расход энергии можно будет установить экспериментально.

### Выводы

1. Рекомендованная различными авторами спирто – солевая перегонка имеет несколько существенных преимуществ, но ее реализация затрудняется необходимостью регенерации отработанной соли. Для этого нужно упаривание, кристаллизация и сушка. Регенерированная соль растворяется во флегме и повторно используется в процессе перегонки.

2. Предлагается регенерацию отработанной соли проводить в подогретом до необходимой температуры слое химически инертной жидкости. В результате получается суспензия кристаллов сухой соли, которую насосом можно перекачать, направляя в верхнюю часть перегонной колонны. При этом отпадает необходимость создавать флегму, что дает возможность сэкономить энергию.

3. Расход энергии при производстве абсолютного спирта по сравнению с методом молекулярного сита уменьшается почти наполовину.

4. Предлагаемый способ обезвоживания спирта может быть использован при получении биоэтанола непосредственно из спирта-сырца без

предварительного снижения его водосодержания ректификацией.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Barba, D., Brandani, V., Giacomo, G.D.* Hyperazeotropic ethanol salted-out by extractive distillation. Theoretical evaluation and experimental check (1985). In: *Chemical Engineering Science*, 40(12), pp. 2287.
2. *Furter, W.F.* Production of Fuel-Grade Ethanol by Extractive Distillation Exploiting the Salt Effect (1993), *Can, Separation and Purification Methods*, 22 (1), pp. 1-21.
3. *Pinto, R.T.P., Wolf-Maciel, M.R., Lintomen, L.* Saline extractive distillation process for ethanol purification (2000). In: *Computers and chemical Engineering*, 24, pp. 1698-1694.
4. *Бремерс Г., Галобурда Р., Айзилс Г.* Расширение возможностей использования солевой дистилляции. *Промышленная теплотехника*. – 1999. – 21, № 2-3, – с. 56-58.
5. *Цунарис И.Н., Добросердов Л.Л., Коган, В.Б.* Солевая ректификация. – М.: Химия, 1969. – 198 с.
6. *Bremers G., Galoburda R., Gulbis V., Birzietis G.* Ethanol dehydration applying modified method of saline distillation – non-reflux distillation (2002). *International Conference “Energy – saving technologies for drying and hygrothermal processing”*. Proceedings. Moscow, MSAU, V.3, pp.63-69.
7. *Грязнов В.П.* Практическое руководство по ректификации спирта. – М.: Пищевая промышленность., 1987. – 155 с.

Получено 27.08.2005 г.