

КОНСТРУКЦИЯ СМЕСИТЕЛЯ "ЦИЛИНДР-ЦИЛИНДР"

Малая Е.Г., Голованчиков А.Б., Аристова Ю.В., Дулькина Н.А.

Волгоградский государственный технический университет.

E-mail: Arisjulia@yandex.ru, pahp@vstu.ru

Смесители успешно применяются в химической, нефтехимической, биохимической, фармакологической, горноперерабатывающей и других отраслях промышленности, в производстве лакокрасочных материалов, паст, мастик, герметиков, клеев, пластмасс, пищевых продуктов, косметических и гигиенических материалов, а также в экологических процессах очистки сточных вод и дисперсных жидких систем.

Смесители являются универсальным оборудованием, предназначенным для работы как с порошкообразными материалами, так и с жидкими с чрезвычайно широким диапазоном вязкости – от легкотекучих до полутвердого состояния.

Смесители являются универсальным оборудованием, предназначенным для работы как с порошкообразными материалами, так и с жидкими с чрезвычайно широким диапазоном вязкости – от легкотекучих до полутвердых.

В зависимости от физико-механических свойств компонентов используют те или иные принципы смешения. При этом учитывается различие компонентов смеси по размеру твердых частиц, плотности жидкостей, вязкости.

Поскольку свойства компонентов разнообразны, то в настоящее время разработано большое количество смесительного оборудования.

Однако основными недостатками конструкций смесителей являются относительная сложность конструкции, и как следствие, низкая надежность в результате больших вращающихся масс, повышенная энергоемкость и металлоемкость.

Предлагается усовершенствованная конструкция смесителя с гидромуфтой типа «цилиндр-цилиндр» (рисунок), позволяющая упростить его конструкцию и эксплуатацию, возможность переналадки с переходом от перемешивания одной жидкости к другой и проводить технологический процесс в оптимальных условиях [1].

Смеситель содержит пропеллерную или турбинную мешалку 1 для центрального быстрого перемешивания, закрепленную на валу 2 привода и рамную или якорную мешалку 3, установленную соосно с валом 2 в корпусе 4 для периферийного медленного перемешивания, к лопастям которой прикреплен поплавок 5, выполняющий роль опоры тихоходной мешалки и выполненный, например, в виде пустотелого тора, и ведомая полумуфта, выполненная в виде цилиндрического патрубка 6 длиной l , установленного осесимметрично с валом 2, при этом отношение внутреннего диаметра патрубка 6 к диаметру вала 2 подчиняется соотношению

$$\frac{D}{d} = 1,10 \div 1,25, \quad (1)$$

где D и d – соответственно внутренний диаметр патрубка и диаметр вала.

Выполнение ведомой муфты в виде цилиндрического патрубка, установленного осесимметрично с валом, позволяет использовать сам вал в качестве ведущей полумуфты, то есть отказаться от установки на валу специальной конструкции этой полумуфты, как например, диска, используемого в прототипе, что упрощает конструкцию мешалки, асимметричная установка цилиндрического патрубка позволяет передавать крутящий момент от вала к тихоходной мешалке без взаимного трения поверхностей вала и цилиндрического патрубка. Уменьшение соотношения внутреннего диаметра патрубка и диаметра вала ниже указанного предела

$$\frac{D}{d} < 1,10$$

также может привести к периодическому взаимному трению поверхностей вала и патрубка из-за раскачивания тихоходной мешалки, особенно в смесителях малого объема, где кольцевой зазор между внутренней поверхностью патрубка и диаметром вала становится минимальным.

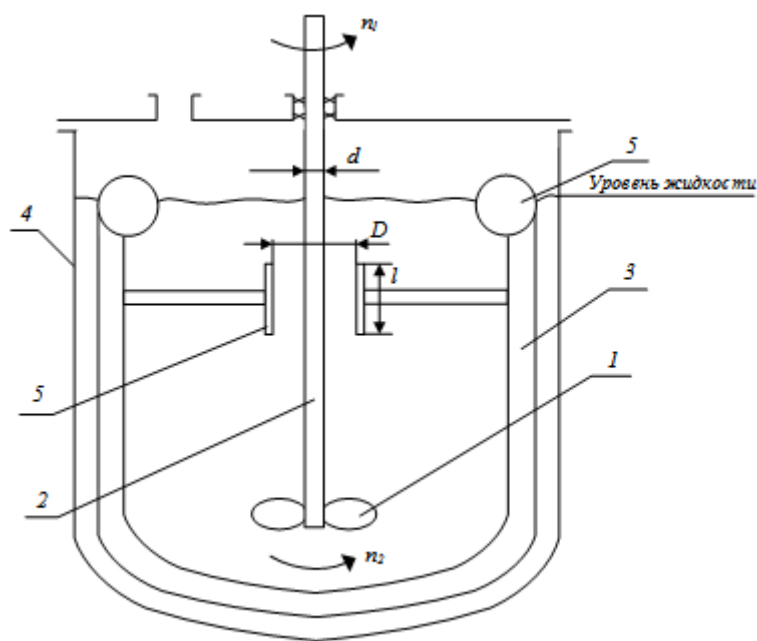
Увеличение соотношения внутреннего диаметра патрубка и диаметра вала выше указанного предела

$$\frac{D}{d} > 1,25$$

приводит к резкому уменьшению крутящего момента, передаваемого от вала к тихоходной мешалке и снижению ее числа оборотов.

Крутящий момент, передаваемый от быстроходного вала к тихоходной мешалке, зависит в прямой степени от вязкости перемешиваемой среды и длины патрубка и в обратной степени от величины кольцевого зазора δ , где $\delta = (D - d)/2$, то длину l и внутренний диаметр патрубка D можно регулировать, а значит, подобрать необходимое число оборотов тихоходной мешалки, что также значительно упрощает не только конструкцию, но и эксплуатацию смесителя, легко переналаживая его с одной перемешиваемой жидкости на другую.

Смеситель работает следующим образом. Вал с быстроходной мешалкой, создающей зону перемешивания в центральной части корпуса, вращается от привода с числом оборотов n_1 . Крутящий момент к тихоходной мешалке, создающей зону перемешивания в периферийной части корпуса и вращающейся с числом оборотов $n_2 < n_1$ передается через кольцевой зазор δ между внутренней поверхностью патрубка 6 и поверхностью вала, образующих гидромфту типа "цилиндр-цилиндр" и использующей в качестве рабочей жидкости саму перемешиваемую жидкость: раствор, суспензию или эмульсию.



Рисунок

Так как поплавок находится на поверхности перемешиваемой жидкости, то патрубок 6 постоянно в нее погружен на всей длине l и колебания уровня жидкости не влияют на передаваемый крутящий момент от вала к тихоходной мешалке.

Изменение крутящего момента и числа оборотов тихоходной мешалки n_2 можно производить, варьируя длину l патрубка и величину кольцевого зазора δ между этим патрубком и валом в пределах указанного соотношения (1).

Для высоковязких жидкостей в смесителях большого объема чтобы увеличить скорость вращения n_2 тихоходной мешалки, необходимо увеличить длину l и уменьшить кольцевой зазор $\delta = D - d$, что вызовет увеличение крутящего момента, передаваемого к лопастям тихоходной мешалки.

Для маловязких жидкостей в смесителях среднего и малого объемов для снижения числа оборотов n_2 тихоходной мешалки необходимо уменьшить длину l и увеличить кольцевой зазор δ , что вызовет снижение крутящего момента, передаваемого к лопастям тихоходной мешалки.

Достоинствами конструкции смесителя является то, что можно отказаться от установки специальной конструкции ведущей полумуфты на валу, а использовать сам вал в качестве такой полумуфты. Переход на гидромуфту типа "цилиндр-цилиндр" с осесимметричной установкой в качестве ведомой полумуфты патрубка с соотношением внутреннего диаметра к диаметру вала, удовлетворяющим условию (1), позволяет, изменяя длину этого патрубка и кольцевой зазор между поверхностями патрубка и вала, регулировать число оборотов тихоходной мешалки в зависимости от вязкости и объема перемешиваемой жидкости.

Литература

- [1] Голованчиков А.Б., Дулькина Н.А., Аристова Ю.В., Ужва Ю.О., Протасова Е.И. Пат. 109010 Российская Федерация, МПК⁵¹ В 01 F 7/16. Смеситель; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. № 2011118806/05; заявл. 10.05.11; опубл. 10.10.11.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИБОРНЫХ УЗЛОВ ИЗ МЕДНЫХ ТРУБ

Шафеева Л.Р., Хуснутдинова А.А.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет.

E-mail: posohin@kgasu.ru

В современных зданиях применяют как вертикальные, так и горизонтальные системы отопления. Для эффективной работы этих систем должны быть использованы высокотехнологичные тепловое и насосное оборудования, терморегулирующая арматура и трубы с длительным сроком службы, к которым относятся медные трубы. Кроме того, эти системы должны быть индустриальными, с унифицированными приборными узлами и терморегулирующими клапанами. Применение унифицированных узлов упрощает расчет и ускоряет процесс изготовления трубных заготовок и сборки указанных систем.

Расчет современных приборных узлов с зарубежными термостатическими клапанами по отечественным справочникам либо невозможен, либо не описывает всех исходных данных, позволяющих с пониманием вести необходимые расчеты методом характеристик сопротивления. Выходом из создавшегося положения могут быть экспериментальные исследования, которые позволили бы получить суммарные характеристики унифицированных приборных узлов.

Гидравлическое сопротивление унифицированных приборных узлов складывается из отдельных сопротивлений прямых участков труб, местных сопротивлений элементов узла и сопротивлений термостатических клапанов при различных позициях регулирования.

Потери давления в приборных узлах можно определить по формуле

$$\Delta P_{\text{узла}} = S_{\text{узла}} \cdot G^2, \quad (1)$$

где G – расход воды, кг/ч;

$S_{\text{узла}}$ – характеристика гидравлического сопротивления узла, учитывающая потери давления как на трение, так и в местных сопротивлениях, $\text{Па}/(\text{кг}/\text{ч})^2$, которая включает

в себя характеристики сопротивлений подводов к приборам и замыкающего участка, поэтому их длины не следует учитывать при определении длины этаже-стояка.

Согласно [1]:

$$S_{\text{узла}} = P_{\text{уд}} \cdot \left(\frac{\lambda}{d_B} \cdot \ell + \sum \zeta \right) = P_{\text{уд}} \cdot \zeta_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения для медных труб [2].

ℓ – длина трубопровода, м;

d_B – внутренний диаметр трубы, м;

$\zeta_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент местного сопротивления приборного узла.

ζ – коэффициент местного сопротивления;

$P_{\text{уд}}$ – удельное гидродинамическое давление возникающее при расходе воды 1 кг/ч, Па/(кг/ч)², которое определяется как:

$$P_{\text{уд}} = \frac{G}{3600^2 \cdot 2\pi^2 \cdot \rho \cdot d_B^4} \quad (4)$$

Если при гидравлических расчетах систем отопления принять плотность воды – ρ постоянной, то в автомодельной области, где имеет место устойчивый турбулентный режим, значения $P_{\text{уд}}$, $\frac{\lambda}{d_B}$ и S могут быть определены как постоянные для заданного диаметра труб:

d_B , мм	13	15	20
$P_{\text{уд}}$, Па/(кг/ч) ²	$22,86 \cdot 10^{-4}$	$12,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
λ / d_B , 1/м	4,6	1,52	1,188
S , Па/(кг/ч) ²	$105,14 \cdot 10^{-4}$	$19,456 \cdot 10^{-4}$	$4,753 \cdot 10^{-4}$

где S – характеристика сопротивления участка трубопровода.

Учитывая тот факт, что приборный узел состоит из нескольких близко расположенных фасонных частей и терморегулирующей арматуры приведенный коэффициент местного сопротивления $\zeta_{\text{пр}}$ узла определяется экспериментальным путем.

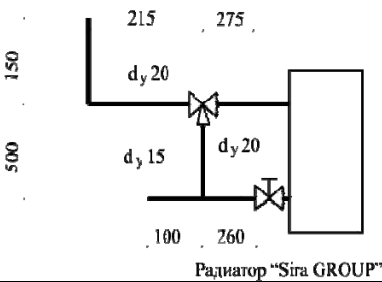
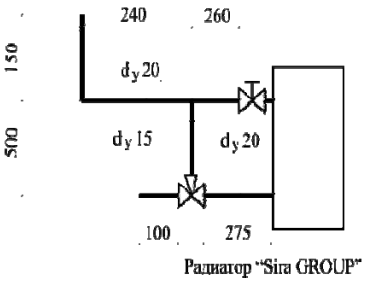
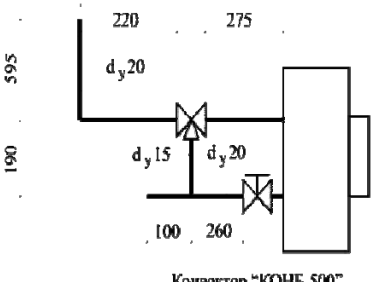
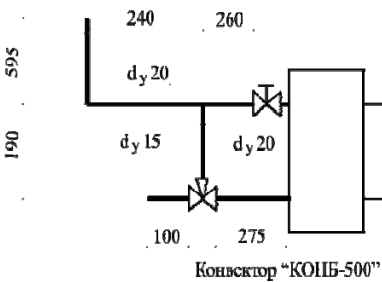
Значения $\zeta_{\text{пр}}$ приборных узлов однетрубных систем отопления из медных труб при различных позициях регулирования расхода теплоносителя с использованием трехходовых и проходных клапанов получены экспериментальным методом в лаборатории ТГВ КГАСУ, результаты которых представлены в таблице.

Из таблицы видно, что приведенный коэффициент местного сопротивления приборного узла – $\zeta_{\text{пр}}$ зависит от степени открытия трехходового термостатического клапана и от конструкции отопительного прибора. $\zeta_{\text{пр}}$ имеет большое значение в том случае, когда ручка трехходового термостатического клапана находится в положении 5, соответствующее 45 градусам.

В этом положении трехходовой термостатический клапан выполняет как распределительную, так и смесительную функции. Однако, значение приведенного коэффициента местного сопротивления приборного узла $\zeta_{\text{пр}}$ становится больше в том случае, когда настройка клапана соответствует выполнению смесительной функции, что должно быть учтено при определении потерь давления в приборных узлах из медных труб.

Таким образом, на основе проведенных исследований представляется возможность определить потери давления в унифицированных приборных узлах с трехходовыми и проходными термостатическими клапанами фирмы “Herz”.

Таблица

Эскиз унифицированного узла		ζ_{np} при различных позициях регулирования трех- ходового термостатического клапана типа “МХОЗ ¾ KV4”						
		Номера						
		0	1	3	5	7	9	10
		Градусы						
		0	15	30	45	60	75	90
1	 Рadiator “Sira GROUP”	23,2	26,0	28,0	30,0	26,0	22,5	15,5
2*	 Рadiator “Sira GROUP”	32,3	32,8	33,7	38,0	26,5	18,4	17,14
3	 Конвектор “КОНБ-500”	21,1	23,0	24,0	36,0	22,5	19,0	13,0
4*	 Конвектор “КОНБ-500”	27,43	30,0	31,65	37,49	36,7	20,65	16,66

* – Трехходовой термостатический клапан работает как смесительный,
а в остальных случаях – как распределительный клапан

Литература

- [1] Богословский В.Н., Крупнов Б.А., Сканава А.Н. и др. «Внутренние санитарно-технические устройства». М.: *Стройиздат*. 1990. 344с.
- [2] СП 40-108-2004. «Проектирование и монтаж внутренних систем водоснабжения и отопления зданий из медных труб. М.: *ФГУП ЦПП*. 2005. 31с.

СМЕСИТЕЛЬ ПЛАНЕТАРНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Почеревин А.В.

Бийский технологический институт, филиал

Алтайского государственного технического университета имени И.И. Ползунова.

E-mail: info@bti.secna.ru

Под смешением принято понимать такой механический процесс, в результате которого первоначально находящиеся отдельно компоненты после равномерного распределения каждого из них в смешиваемом объеме материала образуют однородную смесь. Сложность осуществления процесса смешения зависит в первую очередь от агрегатного состояния смешиваемых продуктов. К числу наиболее неудобных для смешения продуктов следует отнести сыпучие материалы. Машины и аппараты, в которых смешиваются материалы, обычно называют смесителями. По конструкции они весьма разнообразны и для выполнения одной и той же задачи смешения порой используются десятки конструктивно разных смесителей.

Научно обоснованный выбор конструкции смесителя, предназначенного для смешения конкретных материалов, должен начинаться с изучения физико-механических свойств этих материалов, т.к. они существенно влияют на конструктивные особенности смесителя и режим его работы [1]. Могут использоваться гравитационные, центробежные периодического действия и прямоточные, барабанные, вибрационные, червячно-лопастные, лопастные смесители и ряд других. В то же время часто требуются универсальные смесители, легко переналаживаемые на переработку различных сред с различным весовым соотношением и физико-механическими свойствами, что, в первую очередь, целесообразно с экономической точки зрения. Кроме этого, общий недостаток у вышеперечисленных смесителей – часто низкое качество смеси при работе с материалами, значительно различающимися по плотности, и особенно при переработке материалов, склонных к адгезии (прилипание к стенкам, рабочим органам) и когезии (слипание частиц друг с другом).

На основе анализа процесса смешения высоковязких сред разработана конструкция планетарного смесителя периодического действия с лопастными мешалками, вращающимися в цилиндрической ёмкости. Планетарный смеситель с вертикально расположенными мешалками является в определённой степени универсальным смесителем. Он предназначен для перемешивания и смешения сыпучих материалов различного гранулометрического состава, а также жидковязких компонентов. Смеситель может быть использован для переработки составов, содержащих чувствительные и агрессивные компоненты.

Основной частью смесителя является механизм смешения, конструкция которого показана на рисунке. Корпус 1 является несущим, имеет опорные лапы для установки на раму, бобышки для крепления направляющих 7. К верхнему фланцу крепится корпус привода 2, нижний фланец имеет центрующий пояс и уплотнение для стыковки чаши. Планетарный редуктор 3 предназначен для передачи вращения от приводного механизма к мешалкам и перемещения мешалок вокруг оси камеры смешения. Мешалки 4 и 5 являются основными рабочими органами. Мешалки имеют сложную геометрическую форму, обеспечивающую эффективную работу в сопряжении между собой. Быстроходные мешалки 4 вращаются в два раза быстрее тихоходной мешалки 5. Взаимное вращение мешалок и перемещение их относительно оси камеры смешения обеспечивают эффективное смешение компонентов смеси и отсутствие застойных зон. Корпус привода 2 предназначен для

установки планетарного редуктора и мотор-редукторов. При помощи нижнего фланца производится стыковка с опорным корпусом. Крышка 6 закрывает приводной механизм и является опорным элементом для мотор-редукторов 8 и 9. Крышка устанавливается на корпус 2 при помощи штифтов.

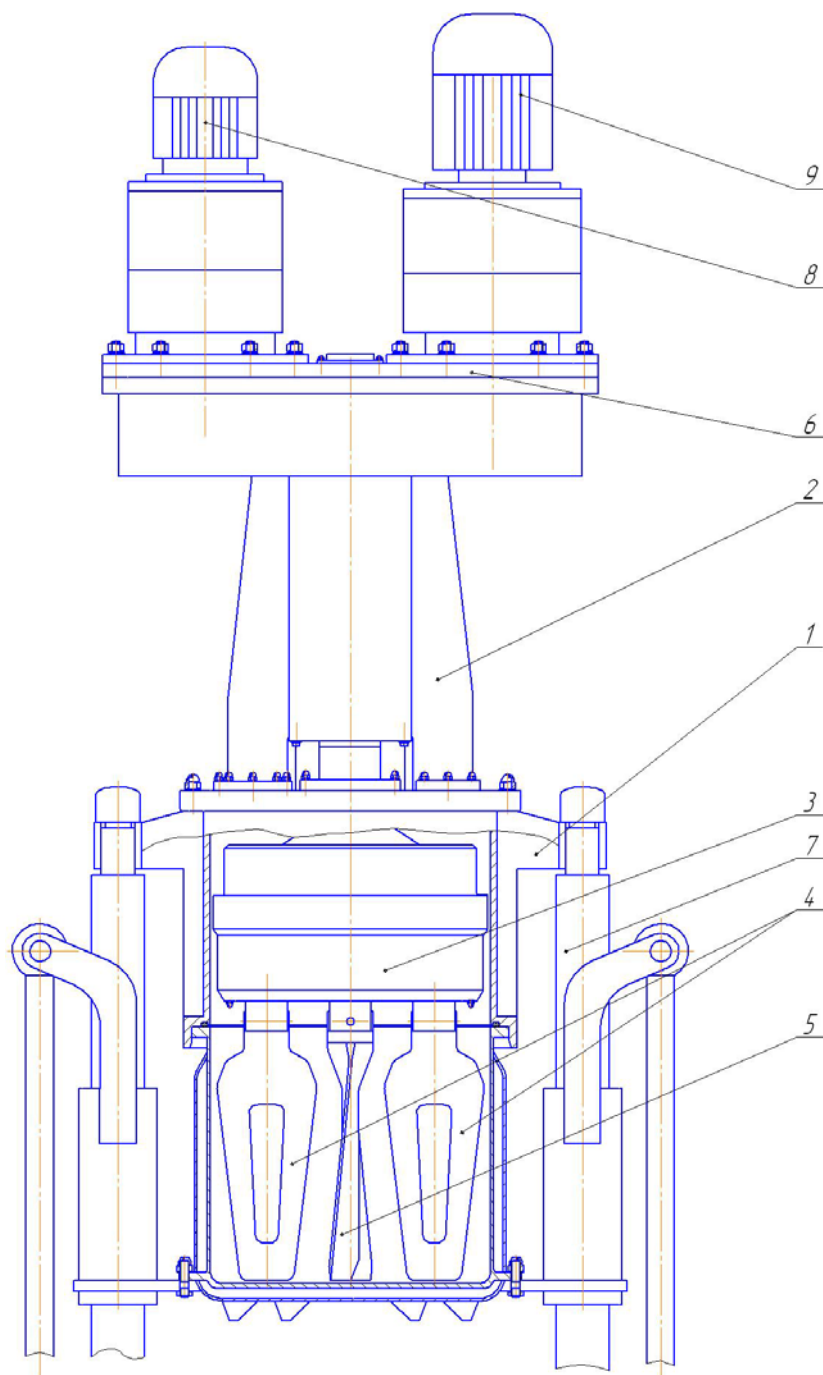


Рисунок. Схема механизма смещения планетарного смесителя.

- 1 – Корпус; 2 – корпус привода; 3 – планетарный редуктор;
4 – быстроходная мешалка; 5 – тихоходная мешалка; 6 – крышка;
7 – направляющая; 8, 9 – мотор-редуктор.

В частности, данный смеситель может применяться для приготовления паст в производстве смесевых ракетных твёрдых топлив (СРТТ). Паста представляет собой высококонцентрированную суспензию с высоким содержанием твёрдой дисперсной фазы. В качестве жидкой среды используется раствор полимера (смесь синтетического каучука с пластификатором, в качестве которого применяют индустриальное, трансформаторное, вазелиновое масла, в некоторых случаях нитроглицерин), а в качестве твёрдой фазы (наполнителя) смесь, состоящая из поверхностно-активных веществ (ПАВ), антиоксидантов (ингибиторы отверждения), и энергетических добавок (металлические порошки) [2].

ПАВ адсорбируются на поверхности твёрдых частиц наполнителя, тем самым изменяя процессы, происходящие на границе раздела фаз. С одной стороны, меняется интенсивность коагуляционного контакта между частицами наполнителя, с другой – взаимодействие поверхности наполнителя с полимерным связующим. Как правило, содержание ПАВ колеблется от 0,1 до 0,3 %, что приводит к снижению вязкости топливной массы на один порядок. Т.к. твёрдая фаза представлена в виде сыпучего материала, то это обуславливает достаточно большую поверхность для тепло и массообмена, и соответственно высокую интенсивность теплопередачи.

Основная цель процесса смешения – это получение однородной, качественной смеси. Как было сказано выше для приготовления смеси, используется раствор полимера. Он представляет собой очень вязкую, густую жидкость с большой плотностью, и смешение с наполнителем при обычных условиях не даёт желаемых результатов. Известно, что чем выше температура раствора полимера, тем ниже его вязкость и плотность. С одной стороны это позволит более равномерно распределить компоненты наполнителя по всему объёму смеси, а с другой снизить потери мощности на преодоление сопротивления со стороны перемешиваемой среды. В связи с этим процесс целесообразнее проводить при нагревании. Поэтому ёмкость корпуса аппарата оснащается теплообменной рубашкой, в которую подаётся горячий теплоноситель (вода). Исходя из этого, основной задачей исследования является определение требуемого температурного режима и наиболее оптимальных условий для проведения процесса. Уравнение теплового баланса процесса смешения компонентов будет выглядеть следующим образом

$$\frac{M}{\tau} \cdot c_1 \cdot (t_{1K} - t_{1H}) + Q_{\Pi} = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp} = G \cdot c_2 \cdot (t_{2H} - t_{2K}) \quad , \quad (1)$$

где M – масса смеси в аппарате, кг; τ – время нагрева смеси, с; c_1, c_2 – средняя удельная теплоёмкость, соответственно, смеси и воды, Дж/(кг·К); t_{1H}, t_{1K} – температура смеси, соответственно, в начальный момент подачи теплоносителя в рубашку и при установившемся режиме теплообмена, К; Q_{Π} – тепловые потери, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности теплообмена, м²; Δt_{cp} – средняя разность температур горячего и холодного теплоносителя, К; G – расход теплоносителя, подаваемого в рубашку, кг/с; t_{2H}, t_{2K} – температура теплоносителя, соответственно, на входе в рубашку и на выходе из неё, К.

Данное уравнение характеризует две стадии процесса теплообмена. Первая стадия – нагревание смеси до требуемой температуры. Она описывается уравнением (1) и зависит от поверхности теплообмена и интенсивности теплопередачи. Решение уравнения позволяет найти время нагрева смеси. Вторая стадия – поддержание требуемой температуры смеси. Эта стадия описывается вторым слагаемым уравнения (1), т.е. в результате расчёта необходимо определить с каким расходом и температурой требуется подавать теплоноситель в рубашку аппарата, учитывая тепловые потери в окружающую среду. Коэффициент теплопередачи определяется по следующей формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad , \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи смеси, Вт/(м²·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи теплоносителя, Вт/(м²·К); $\frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}}$ – термическое сопротивление стенки корпуса аппарата, м²·К/Вт.

Исходя из формулы (2), интенсивность теплопередачи от теплоносителя к смеси будет определяться в основном термическим сопротивлением стенки корпуса аппарата и теплоотдачей от этой стенки к смеси. В свою очередь термическое сопротивление стенки зависит от её толщины и коэффициента теплопроводности материала, из которого изготовлен корпус аппарата. Чем меньше сопротивление (меньше толщина стенки и больше коэффициент теплопроводности), тем интенсивнее будет протекать процесс теплообмена. Коэффициент теплоотдачи для аппарата, оборудованного теплообменной рубашкой, при перемешивании жидкой среды, определяется следующим образом, согласно [3]

$$\alpha_1 = 0,36 \cdot \text{Re}^{0,67} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_c}{\mu_{cm}}\right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1} \cdot \frac{\lambda_c}{d_m}, \quad (3)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_c \cdot n \cdot d_m^2}{\mu_c}, \quad (4)$$

$$\text{Pr} = \frac{c_1 \cdot \mu_c}{\lambda_c}, \quad (5)$$

где Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля; μ_c , μ_{cm} – вязкость смеси, соответственно, в аппарате и при температуре стенки корпуса аппарата, Па·с; λ_c – теплопроводность смеси, Вт/(м·К); d_m – диаметр мешалки, м; Γ – симплекс геометрического подобия (отношение внутреннего диаметра корпуса аппарата к диаметру мешалки); ρ_c – плотность смеси, кг/м³; n – частота вращения мешалки, 1/с.

Как видно из формул (3)–(5) на коэффициент теплоотдачи и в целом на интенсивность теплопередачи, влияют основные характеристики смеси c_1 , ρ_c , μ_c , λ_c , которые непосредственно зависят от создаваемого температурного режима. Температура смеси, в свою очередь, определяется температурой теплоносителя, подаваемого в рубашку, и термическим сопротивлением стенки корпуса. Таким образом, расчёт сводится к определению температуры теплоносителя для достижения требуемых конечных результатов, а именно качества и однородности смеси. Исходя из экспериментальных и расчётных данных, температура внутри корпуса аппарата должна поддерживаться на уровне 60 °С, а температура теплоносителя на уровне не более 80 °С.

Литература

- [1] Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
- [2] Дементьева Д.И., Кононов И.С., Мамашев Р.Г., Харитонов В.А. Введение в технологию энергонасыщенных материалов. Бийск: АлтГТУ. 2009. 254с.
- [3] Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессы и аппараты химической технологии. Л.: Химия. 1987. 576с.

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ГРУППОВЫЕ ЗАМЕРНЫЕ
УСТАНОВКИ «СПУТНИК МАССА»**

Ильиных О. В., Деев В. С., Сергеев А. Д.

Энгельсский технологический институт, филиал Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

E-mail: mxp@techn.sstu.ru

Для замера дебета нефтяных скважин ОАО «Завод Нефтегазмаш» совместно с Энгельсским технологическим институтом СГТУ (ЭТИ СГТУ) разработал параметрический ряд автоматизированных групповых замерных установок (АГЗУ) «Спутник МАССА». Установка обеспечивает для каждой подключенной на измерение скважины:

- прямые измерения массового расхода и массы сырой нефти;
- прямые и (или) косвенные измерения объемного расхода и объема газа, выделившегося в результате сепарации, с приведением к стандартным условиям;
- прямые или косвенные измерения объемной доли воды в сырой нефти;
- косвенные измерения массового расхода и масса нефти.

Принципиальная технологическая схема АГЗУ представлена на рис. 1. Продукция скважин поступает на АГЗУ по индивидуальным шлейфам, собирается в общий коллектор подается на нефтесборный пункт (НСП). При постановке скважины на замер дебета она отключается от общего коллектора, через многоходовой переключатель скважин ПСМ-8 продукция скважин направляется в сепаратор для разделения на жидкую и газовую фазы. На выходе из сепаратора на линии сырой нефти установлены массовой расходомер и влагомер для измерения массового расхода и влагосодержания воды в сырой нефти. На линии выхода газа установлены объемный расходомер для измерения объемного расхода газа. После замера газ и жидкость поступают в общий коллектор, и направляется на НСП. Сигналы от всех приборов поступают в блок автоматики (БА), где контролер обрабатывает информацию, поступающую от средств измерения и по интерфейсным линиям направляет в операторную и отображает на дисплее компьютера.

Техническая характеристика АГЗУ

Количество входов для подключения скважин – от 1 до 4.

Диапазон измерения расхода:

- массовый расход сырой нефти, т/сут. – от 4 до 2000;
- объемный расход свободного нефтяного газа, $\text{м}^3/\text{сут.}$ – от 5 до 250000.

Параметры рабочей среды:

- избыточное рабочее давление, МПа – от 0,2 до 16,0;
- температура, от +5 до +90 °С;
- обводненность сырой нефти, % - не более 98.

Все оборудование установки расположено в отопляемом, вентилируемом блок-боксе полной заводской готовности. Разработан также вариант передвижной АГЗУ, смонтированный на автомобильном принципе.

В установках производительностью до 400 т/сут используется двухкорпусной горизонтальный сепаратор (рис. 1).

При дебете скважин более 400 т/сут габариты и площадь горизонтального сепаратора резко возрастают, что существенно затрудняет его размещение в блок-боксе. В связи с этим на кафедре «Машины и аппараты химических производств»

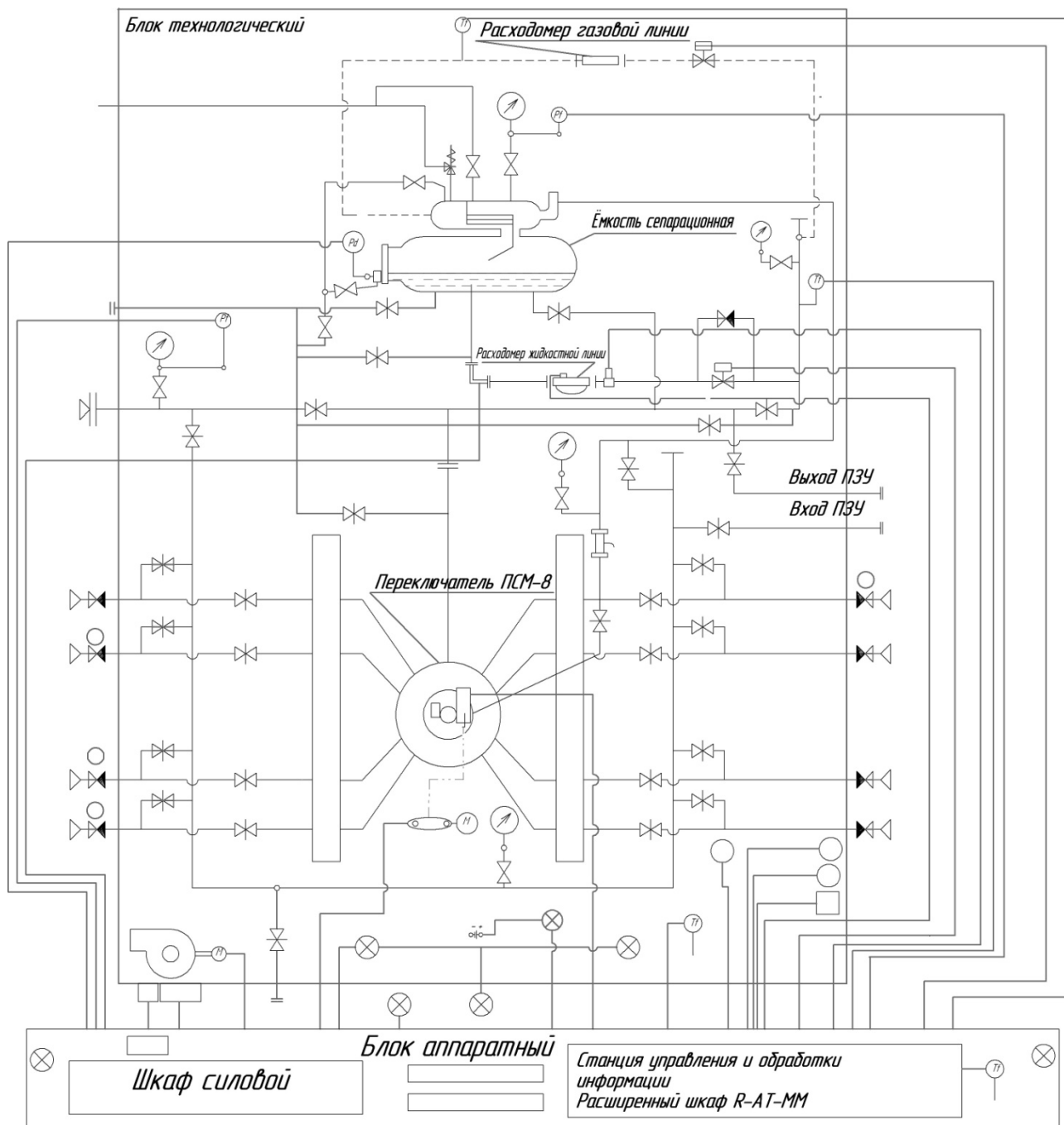


Рис. 1

ЭТИ СГТУ имени Гагарина Ю.А. был разработан вертикальный гидроциклонный сепаратор производительностью по жидкости до 2000 т/сут. при газовом факторе до 150 (см.рис. 2).

Сепаратор состоит из корпуса 1, гидроциклонного входа 2, спирального сепаратора 3 и распределительной тарелки 4. В гидроциклонном входе осуществляется предварительное разделение газожидкостной смеси. Отделенный газ отводится через газовые патрубки установленные на распределительной тарелке 4. Для предотвращения капельного уноса над распределительной тарелкой установлено сепарационное устройство типа кольцо-диск. Окончательное разгазирование нефти осуществляется в спиральном сепараторе. Нефть стекает по наклонной спиральной поверхности слоем толщиной 25-30 мм, что способствует интенсивному выделению растворенного попутного нефтяного газа. Газ удаляется через отверстия в центральной трубе. Вертикальный гидроциклонный сепаратор хорошо вписывается в стандартный блок-бокс с трапециевидной крышей.

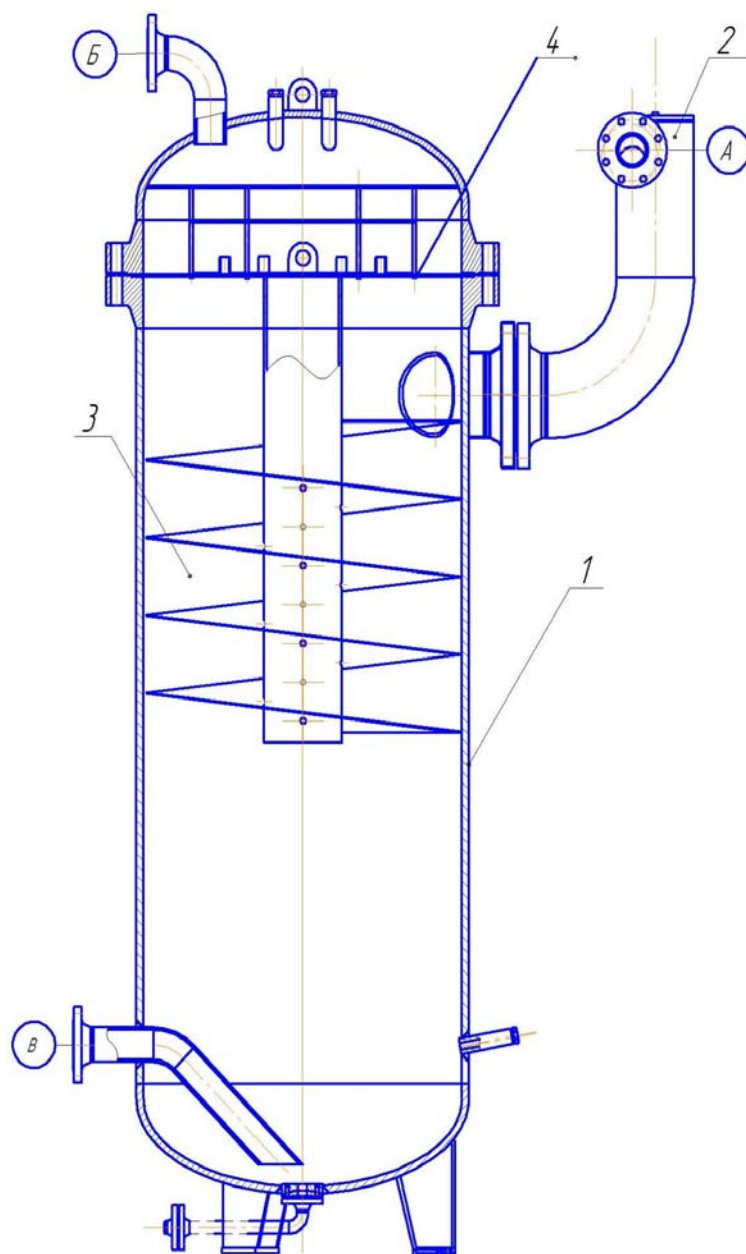


Рис. 2

Литература

[1] Лутошкин Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды. М.: издательство Альянс. 2011. 224с.

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Чернов Н.С., Захарова М.А., Сорокина А.К.

Тольяттинский государственный университет. E-mail: office@tltsu.ru

Теплообменные процессы в промышленности, энергетике, транспорте, различных конструкций теплообменных аппаратов (ТА). Эти конструкции в каждом конкретном случае должны обеспечивать оптимальное сочетание тепловой эффективности, удобства эксплуатации, по возможности малых капиталовложений и эксплуатационных расходов.

Неотъемлемая часть любого технологического процесса получения химических продуктов – теплообменные процессы (нагревание-охлаждение, испарение-конденсация). Аппараты, в которых происходит передача теплоты от одного теплоносителя к другому, называют теплообменниками. В зависимости от этих процессов ТА делят на подогреватели, охладители, испарители и конденсаторы.

По роду теплоносителей различают ТА: жидкость-жидкость; пар-жидкость; газ-жидкость; пар-пар; пар-газ и газ-газ.

По функциональным признакам ТА делятся на поверхностные (рекуперативные и регенеративные) и контактные. В рекуперативных поверхностных ТА обменивающие теплотой среды протекают одновременно и передача теплоты происходит через разделяющую их поверхность. Рекуперативные ТА наиболее распространены и используются в самых различных областях техники. В регенеративных ТА поверхность теплообмена по очереди омывается то греющим, то нагреваемым теплоносителем.

По характеру движения теплоносителей ТА делят на три типа: с естественной циркуляцией – испарители, выпарные аппараты, водогрейные и паровые котлы, у которых теплоноситель движется благодаря разности плотностей жидкости; с принудительной циркуляцией – рекуперативные теплообменники, выпарные аппараты и испарители; с движение жидкости под действием сил гравитации- конденсаторы, оросительные теплообменники.

По числу теплоносителей ТА классифицируются на двухпоточные, трехпоточные и многопоточные.

По виду конфигурации поверхности теплообмена рекуперативные ТА делят: кожухотрубные с прямыми и гладкими трубами; с U – образными трубами; с оребренными трубами; секционные труба в трубе; змеевиковые; спиральные; пластинчатые; пластинчато- ребристые.

По схемам тока теплоносителей рекуперативные ТА делят на три группы: С постоянной температурой обоих теплоносителей, например, конденсаторы- испарители индивидуальных веществ; с постоянной температурой одного теплоносителя, например, конденсаторы и испарители индивидуальных веществ; с переменной температурой обоих теплоносителей.

В зависимости от взаимного направления потоков теплоносителей в ТА различают прямоток, противоток, перекрестный ток и смешанный ток.

Совершенствование тепловых систем технологических процессов включает следующие аспекты:

- совершенствование режимов течения теплоносителей- соответствующий выбор скоростей;
- оптимизация конструкций ТА- использование новых материалов, таких как алюминий, улучшение компактности за счет применения змеевиковых теплопередающих устройств.

Одним из наиболее широко используемых способов теплообмена является оребрение наружной поверхности труб с использованием метода деформирующего резания (ДР). Повышение теплообмена ТА достигается путем увеличения площади теплообменных поверхностей, контактирующих с теплоносителями, за счет формирования макрорельефа, имеющего оптимальные геометрические параметры.

Метод (ДР) (рис. 1) основанный на прорезании и отгибке слоев поверхностного слоя металла обрабатываемой детали, обеспечивает высокую производительность и широкий диапазон получаемого макрорельефа. Метод реализуется при использовании обычного металлорежущего оборудования и является безотходным.

Инструмент для ДР имеет геометрические формы, исключаяющие разрушения подрезаемого слоя (стружки). Управление всеми геометрическими параметрами получаемого макрорельефа осуществляется путем выбора геометрических параметров инструмента и режимов ДР.

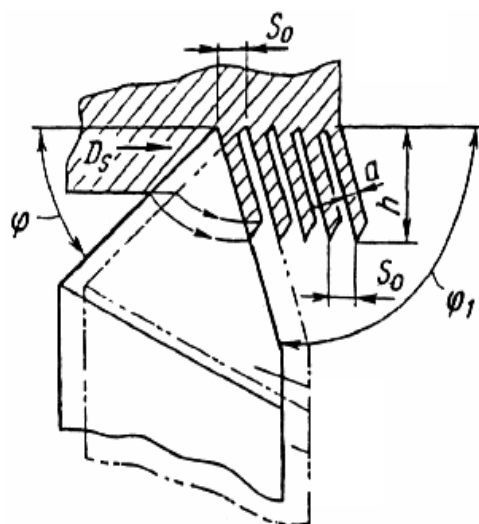


Рис. 1. Схема формообразования оребренной поверхности теплообменной трубы

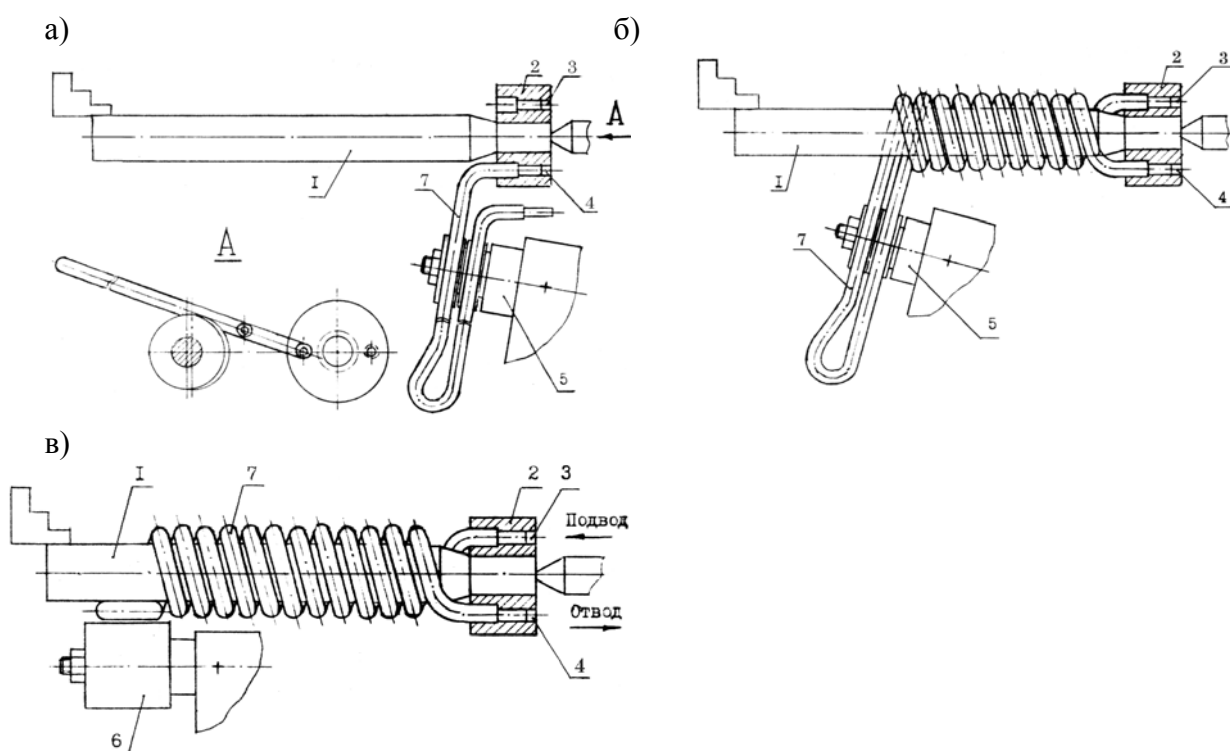


Рис. 2. Способ изготовления змеевиков из оребренных труб: а – закрепление концов оребренной трубы в отверстиях головки; б – одновременная навивка двух ветвей трубы; в – укладка петли после навивки змеевика; 1 – оправка; 2 – головка; 3 и 4 – отверстия; 5 – направляющий ролик; 6 – гладкий ролик; 7 – труба оребренная.

Параметрами оребрения влияющими на эксплуатацию характеристики ТА являются: высота (h) и толщина (a), шаг (S_0) оребрения. Площадь поверхности после обработки методом ДР может быть увеличена до 14...15 раз.

Исследования установлено, что наилучшие характеристики ТА по интенсификации теплообмена достигаются при следующих параметрах оребрения поверхности теплообмена $S_0 = 1,5$ мм, $h = 3$ мм и $a = 0,75$ мм.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что оребрение сформированное методом ДР на трубах, позволяет их гибку с радиусом изгиба меньшими, чем для

гладкой трубы, поскольку часто расположенные ребра выполняют функцию элементов жесткости. Эта особенность позволяет навивать (рис. 2) малогабаритные змеевики любого размера, а на их основе разрабатывать малогабаритные эффективные конструкции ТА. Изготовление змеевиков с одновременной навивкой двух ветвей согнутой оребренной трубы (рис. 2б) позволяет расширять область использования змеевиков в многоходовых ТА с односторонним входом и выходом охлаждающей среды, сократить габариты ТА и упростить их монтаж.

Исследования по повышению эффективности теплообмена позволили установить, что змеевиковые ТА из оребренных труб имеют тепловую эффективность на 28...40% выше, чем аналогичные ТА выполненные из труб оребренных традиционными способами (например, накаткой, проволочное оребрение и т. д) при этом поверхность теплопередачи, отнесенные к одному погонному метру змеевика составляет 0,3...0,5 м²/м, в то время как у ТА общепринятого назначения эта величина находится в пределах 0,09...0,13 м²/м.

Совершенство ТА теплообменных систем технологических процессов оценивают по следующим характеристикам:

1. По тепловой эффективности:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_1 - T_1''}{T_1' - T_2'}$$

Для ТА $\eta = 0,35...0,45$, выше нежелательны, т. к приводит к ухудшению показателей массы и габаритов.

2. По коэффициенту использования объема трубного пучка:

$$K_v = \frac{Q}{V \cdot \Delta T_{ср}} \text{ Вт}(\text{м}^3 \cdot \text{K})$$

где, V- объем охлаждающего элемента, м³

Q- тепловая нагрузка аппарата, Вт

3. По коэффициенту использования массы трубного пучка:

$$K_m = \frac{Q}{M \cdot \Delta T_{ср}} \text{ Вт}(\text{кг} \cdot \text{K})$$

где, M- масса охлаждающего элемента

4. По коэффициенту теплопередачи:

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta T_{ср}} \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

5. По потерям давлений потоков теплоносителей:

$$\Delta P_1 \text{ и } \Delta P_2, \text{ МПа}$$

6. По показателю энергетической эффективности:

$$E = \frac{Q}{(\Delta N_1 + \Delta N_2) \cdot 100}$$

где, ΔN_1 и ΔN_2 - мощность на прокачивание горячего и холодного теплоносителя, кВт

7. По коэффициенту компактности:

$$n_{kp} = \frac{F}{V}$$

отношение поверхности теплопередачи к объему занимаемому её.

Анализ физических явлений и теплообмена в тепловых системах показывает, что теплопередача является функцией скорости и направления движения охлаждающей жидкости в трубах, температурного напора, формы и размеров водяных каналов, а также температуры и физических параметров охлаждающей жидкости (плотность, вязкость, теплопроводность и др.). Основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена между охлаждающей жидкостью и стенками трубок радиатора (змеевика), является толщина ламинарного пограничного слоя. Теплопередача от охлаждающей жидкости к трубкам

радиатора значительно повышается, если непрерывно возмущать пограничный слой (уменьшать его толщину), т.е. увеличивать скорость циркуляции охлаждающей жидкости через радиатор.

Характер движения жидкости определяется критерием Рейнольдса Re .

$$Re = \frac{w \cdot d_{эк}}{\nu}$$

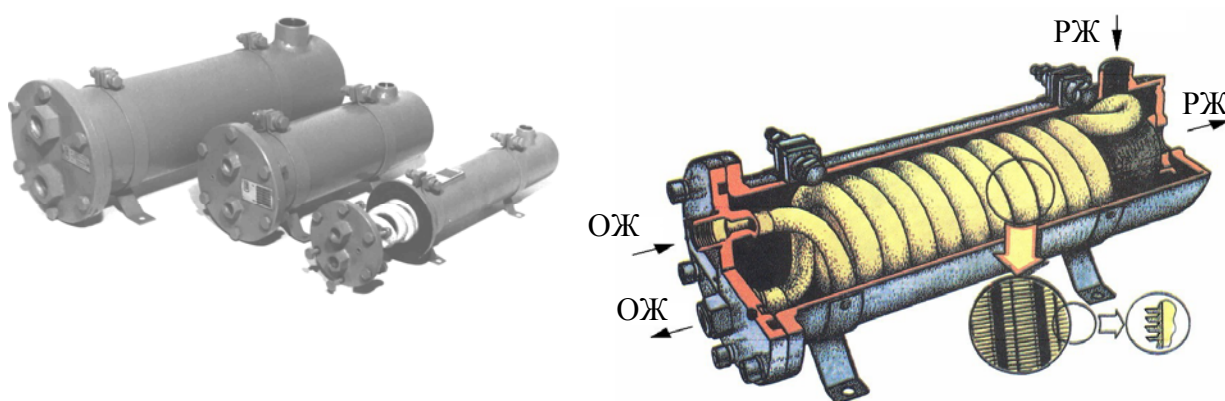
где, w - скорость теплоносителя в м/сек;

$d_{эк}$ - эквивалентный диаметр в м;

ν - кинематическая вязкость теплоносителя в м²/сек

Переход от ламинарного к турбулентному режиму движения охлаждающей жидкости происходит при критическом значении критерия $Re=2200$.

Для получения турбулентности движения потока охлаждающей жидкости и наибольшего значения коэффициента теплопередачи, Re должен быть в пределах 10000, но не менее 5000.



Конструкции змеевиковых ТА

В конструкциях змеевиковых ТА предусмотрено минимальное количество паянных трубных стыков; например, два трубчатых стыка вместо 48 или 64 (для трубчатых ТА) в зависимости от типоразмера, что обеспечивает снижение вредных токсичных выбросов в атмосферу при их изготовлении.

Литература

- [1] Чернобыльский И.И. Машины и аппараты химических производств. М.: Машиностроение. 1975. 416с.
- [2] Маньковский О.Н., Романкова П.Г. и Курочкиной М.И. Теплообменная аппаратура химических производств. Инженерные методы расчёта. Л.: Химия. 1976. 368с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКТИФИКАТОРА С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАСАДКОЙ

Шорсткий И.А., Мамин В.Н.

Кубанский государственный технологический университет.

E-mail: thegector@mail.ru

Введение механической энергии извне вызывает усложнение конструкции роторных аппаратов из-за наличия уплотнительных устройств в местах выхода из аппарата вращающегося вала. Кроме того, монтаж большого числа контактных устройств в промышленных роторных ректификаторах должен быть проведен с тщательным соблюдением зазоров между неподвижными и вращающимися тарелками, укрепляемыми соответственно в неподвижном корпусе и на общем валу, что в общем усложняет конструкцию аппарата.

Для исключения этих недостатков нами разработаны и исследованы роторные аппараты без введения механической энергии, в которых для вращения ротора используется энергия скоростного парового потока. Использование энергии пара для вращения ротора позволяет одновременно осуществлять и турбулизацию взаимодействующих фаз в условии прямотока.

Одна из модификаций контактного устройства роторного аппарата без внешнего подвода энергии показана на рис. 1.

В цилиндрическом корпусе аппарата 1 укреплена неподвижная тарелка, состоящая из сливного кармана 2 и переточных устройств 3. В горловине ее установлена крестовина 4, на которой крепится ось 5 вращающейся насадки с подшипником 6. Основным конструктивным элементом контактного устройства является насадка 9, выполненная в виде внутривихревого диска со спиралевидными каналами, переходящими в сопла и направленными тангенциально к внутренней поверхности корпуса.

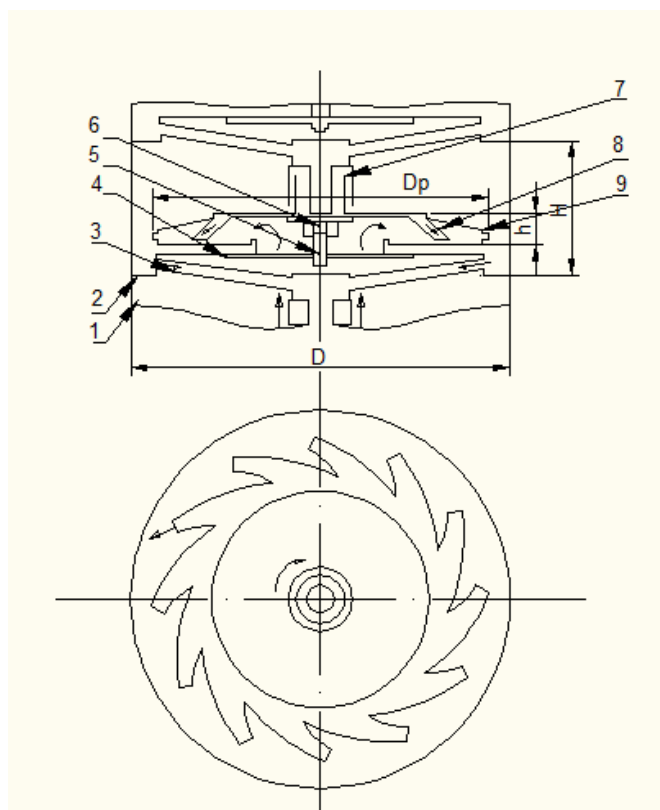


Рис. 1. Контактное устройство

К каждому каналу подведены питательные трубки 8. К отбортовке насадки прикреплен покрывной диск с центральным патрубком 7, прикрытый сверху стаканом переточного устройства неподвижной тарелки вышерасположенного контактного устройства.

Паровой поток через горловину неподвижной тарелки поступает во внутреннюю полость насадки, а затем с большой скоростью выбрасывается из сопел. Появляющиеся при этом реактивные силы приводят насадку во вращение вокруг оси в сторону, противоположную направлению. Парового потока.

Жидкость с контактного устройства по переливным трубам попадает на поверхность насадки, под действием центробежной силы отбрасывается к периферии, а затем по питательным трубкам поступает непосредственно во внутреннюю полость насадки, где осуществляется контакт взаимодействующих фаз.

Аппарат без внешнего подвода энергии извне обладает положительными качествами, которые присущи аппаратам с введением механической энергии, где высокоразвита поверх-

ность фазового контакта: во время контакта с паром происходит образование капель и струи жидкости, а затем их деформация при касательном ударе о неподвижную стенку. Последнее способствует лучшей сепарации пара. Взаимодействие фаз при проточном течении обеспечивает высокую производительность аппарата.

Конструкция аппарата в целом упрощается, т.к. отсутствуют уплотняющие устройства. Сборка аппарата, даже с большим числом контактных устройств также упрощается, поскольку каждое контактное устройство монтируется независимо друг от друга и не связаны общим валом.

При проведении исследований проводилось визуальное наблюдение и измерение частоты вращения насадки строботометром Ст-МЭИ.

Эксперименты проводились на аппарате диаметром 0,32м с тремя контактными устройствами. Насадка диаметром 0,27м имела 12 сопел диаметром 0,0078м. Диаметр головки неподвижной тарелки равнялся 0,14м. Базовая высота контактного устройства 0,15м.

Последовательное исследование аэрогидродинамики контактных устройств в аппарате позволили установить, что при однофазном газовом потоке в неподвижной насадке энергетические затраты на преодоление сопротивления движению газа наименьшие. При вращении насадки они увеличиваются вследствие появления окружной составляющей скорости (рис.2, кривые 1 и 2). Во всех случаях гидравлическое сопротивление возрастает с увеличением скорости газа(пара) по квадратичной зависимости.

С введением жидкостного потока гидравлическое сопротивление контактного устройства увеличивается. Причем с увеличением нагрузки по жидкости гидравлическое сопротивление так же возрастает (рис 3.). Из опытных данных следует, что нагрузка по жидкости оказывает значительно меньшее влияние на изменение величины гидравлического сопротивления, чем увеличение нагрузки на газу (пару). Так, например, при увеличении нагрузки по жидкости в четыре раза гидравлическое сопротивление возрастает в среднем от 1,25 до 1,4 раза.

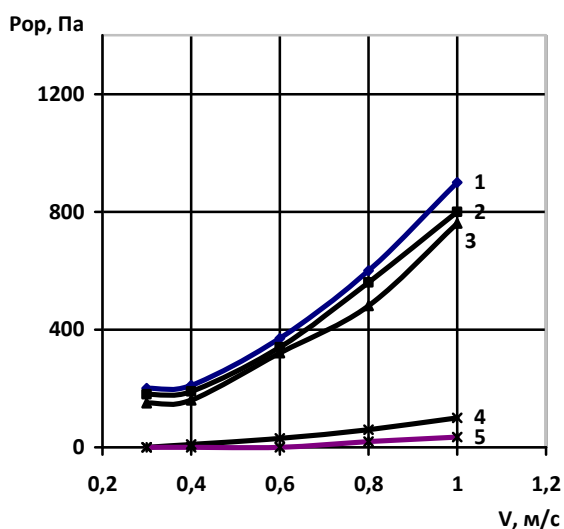


Рис. 2. $L=0$; 1- $n \neq 0$; 2- $n=0$; 3-зона 1; 4-зона 2; 5- зона 3

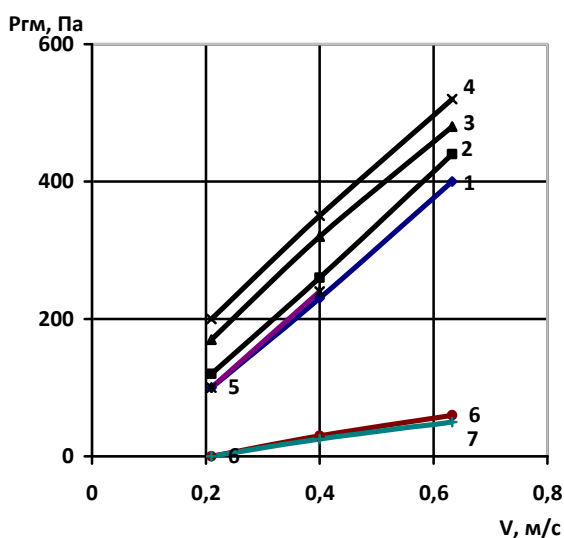


Рис. 3. $L, \text{кг/м}^2\text{ч}$: 1-1580; 2-2000; 3-3340; 4-5120. $L=2000 \text{ кг/м}^2\text{ч}$. 5-насадка неподвижная, 6-зона 2; 7-зона 3

Как следует из рис. 4, частота вращения насадки возрастает с увеличением скорости газа и уменьшается при увеличении нагрузки контактного устройства по жидкости. Увеличение скорости в 1,5 раза вызывает увеличение частоты вращения насадки в 1,8-2,1 раза, в то время

как такое же увеличение нагрузки по жидкости вызывает уменьшение частоты вращения насадки в 1,1-1,3 раза. Это обстоятельство имеет значение при проведении процесса ректификации, связанного, как известно, соотношением L/G . Увеличение скорости вращения насадки способствует повышению степени турбулизации взаимодействующих фаз и интенсификации процесса массообмена.

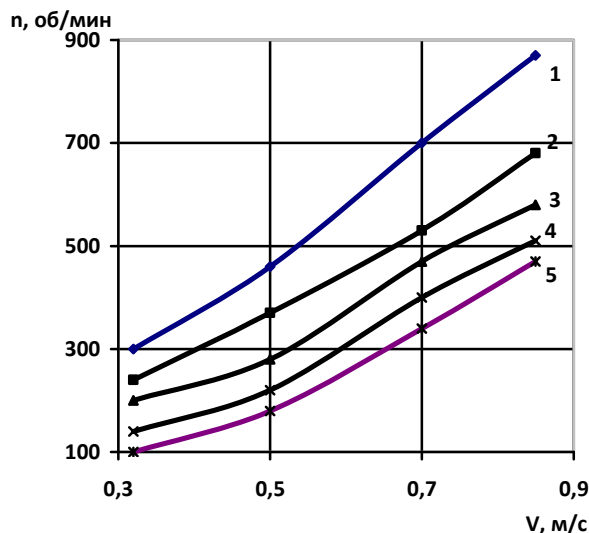


Рис. 4. L , кг/м²ч; 1- 0; 2-748; 3-1150; 4-2000; 5- 3770

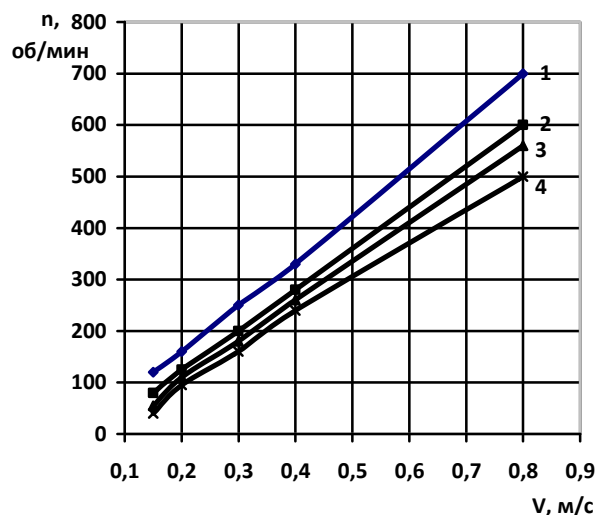


Рис. 5. Значение R : 1-1; 2-2; 3-3; 4- ∞

Исследованы эффективности работы аппарата, в промышленности процессы ректификации проводятся при конечных значениях флегмовых чисел R . Результаты экспериментов по определению влияния флегмового числа на эффективность контактных устройств и частоту вращения насадки приведены на рис. 5.

В исследуемом диапазоне изменений значений флегмового числа заметное влияние на эффективность разделения контактных устройств не установлено. При увеличении флегмового числа, т.е. при увеличении нагрузки аппарата по жидкости при прочих равных условиях частота вращения ротора понижается, что находится в соответствии с ранее проведенными экспериментами.

В результате испытаний в производственных условиях выявлена хорошая сходимость опытных и расчетных данных. Использование в укрепляющей части ректификационной колонны контактных устройств с вращающейся насадкой позволило сократить ее высоту с одновременным улучшением качества спирта-сырца.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУЙНЫХ КОМПРЕССОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

Жибалов А.Ю., Качкаев С.И., Печенегов Ю.Я., Косов А.В.

Энгельсский технологический институт, филиал Саратовского государственного
технического университета им. Гагарина Ю.А. E-mail: mxp@techn.sstu.ru

В качестве греющего теплоносителя в теплообменных устройствах химической и других отраслей промышленности широко используется водяной пар. Отдавая тепло в теплообменном устройстве, пар при рабочем давлении p_1 превращается в конденсат, который проходит через конденсатоотводчик и поступает в сборный конденсатный бак, где давление p_2 . Большинство предприятий имеет открытые паро-конденсатные системы. В них конден-

сатные баки соединены с атмосферой и давление p_2 близко к атмосферному. Снижение давления насыщенного конденсата от p_1 до p_2 приводит к образованию вторичного пара, который из конденсатного бака через свечу обычно выпускается в атмосферу. Таким образом, теряется тепло с выпускаемым паром и химочищенная вода, затраченная на его производство.

Количество вторичного пара, образующегося из 1 кг исходного конденсата определяется выражением

$$g = (h_1 - h_2) / r_2, \text{ кг/кг}, \quad (1)$$

где h_1 и h_2 - энтальпии конденсата при давлениях p_1 и p_2 соответственно;

r_2 - теплота парообразования при давлении p_2 .

Теряемое с вторичным паром тепло, выраженное как доля теплоты конденсации r_1 греющего пара, приведено в виде зависимости от p_1 на рис. 1а. Видно, что с ростом p_1 доля теряемого тепла увеличивается и при $p_1 = 2$ МПа достигает 24 %. Для наиболее используемого в теплотехнологических устройствах давления греющего пара в интервале от 0,3 до 1,0 МПа эта доля составляет от 6 до 16 %.

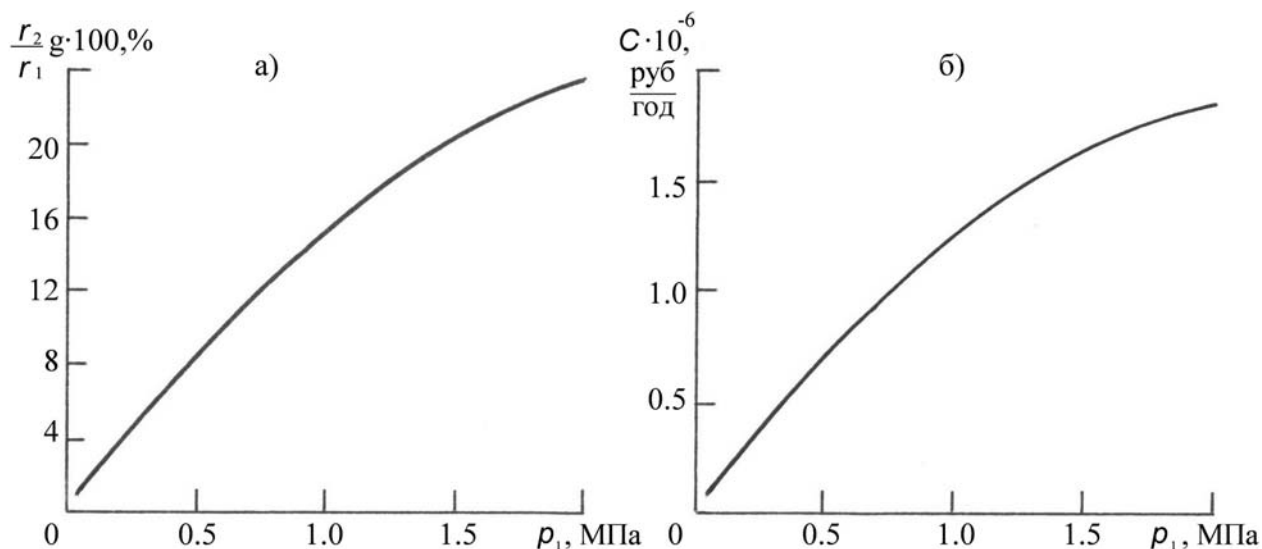


Рис. 1. Зависимости $(r_2g/r_1) \cdot 100$ (а) и C (б) от p_1 при $p_2 = 0,11$ МПа;

б) — расход греющего пара 1 т/ч, цена тепла в паре 2000 руб/Гкал

На рис. 1б приведена зависимость стоимости теряемого тепла за год C от величины p_1 при непрерывном потреблении греющего пара в количестве 1 т/ч. Стоимость 1 Гкал тепла в паре принималась в расчетах равной 2000 рублей. Можно видеть, что экономические потери при выпуске вторичного пара в атмосферу достигают нескольких миллионов рублей в год. С ростом расхода греющего пара потери пропорционально увеличиваются.

Исключить данные потери возможно при использовании струйного компрессора (рис. 2), в котором осуществляется сжатие вторичного пара от давления p_2 за конденсатоотводчиком до требуемого давления p_1 греющего пара в теплообменном аппарате. При этом необходимо располагать инжектирующим паром от источника (котельная, ТЭЦ) с давлением p_0 превышающим p_1 . На предприятиях

необходимый ресурс избыточного давления пара от источников обычно имеется, так как промышленные котлы часто эксплуатируются с перегрузкой по давлению.

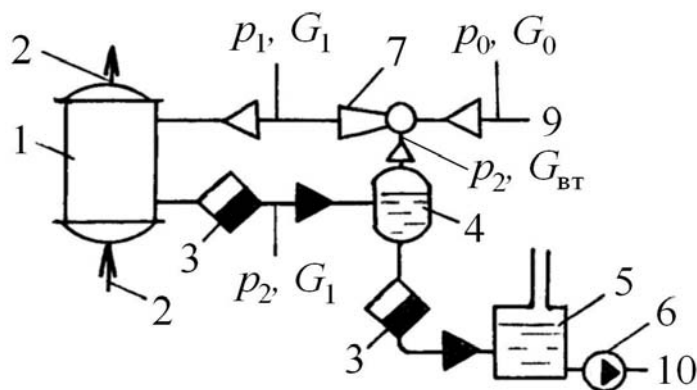


Рис. 2. Схема теплообменной установки со струйным компрессором для сжатия вторичного пара: 1 – теплообменник; 2 – нагреваемый продукт; 3 – конденсатоотводчик; 4 – сепаратор; 5 – конденсатный бак; 6 – конденсатный насос; 7 – струйный компрессор (эжектор); 9 – греющий пар от источника; 10 – конденсат к источнику

Из тепловых балансов процессов смешения в струйном компрессоре и разделения фаз потока в сепараторе при $p_2 = 0,11$ МПа, с учетом зависимостей h и r от давления [1], для коэффициента инжекции компрессора получим

$$u = G_{\text{вт}} / G_0 = (748.53 p_1^{0.25} - 431) / (2680 - 748.53 p_1^{0.25}) \quad (2)$$

и для давления инжектирующего пара

$$p_0 = [u(p_1^{0.25} - 0.576) + p_1^{0.25}]^4, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где давление пара в теплообменнике p_1 в МПа; $G_{\text{вт}}$ и G_0 - расходы инжектируемого (вторичного) и инжектирующего пара соответственно.

Зависимости (2) и (3) представлены графически на рис.3. В рассматриваемой области изменения p_1 от 0,2 до 1,6 МПа критические давления при истечении пара $p_{\text{кр}} = 0,577 p_0 < p_1$, поэтому струйный компрессор должен иметь диффузорную часть и выполняться с профилем сопла Лавалья для повышения давления от $p_{\text{кр}}$ в критическом сечении до p_1 на выходе из сопла. На рис.3 проведена вспомогательная(диагональная) штриховая линия, расстояние по вертикали от которой до линии $p_0 = f(p_1)$ соответствует необходимому для работы струйного компрессора превышению давления p_0 над p_1 . Для области $p_1 < 1$ МПа это превышение невелико. Так, для $p_1 = 0,8$ МПа оно составляет 0,19 МПа.

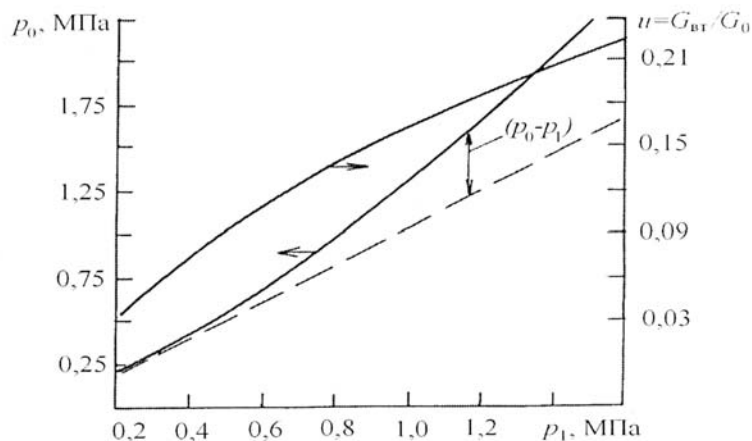


Рис. 3. Зависимость p_0 и u от p_1 при $p_2 = 0,11$ МПа

Расчет струйного компрессора при вычисленных по (2) и (3) значениях u и p_0 может производиться по методике [2, 3].

Литература

- [1] Вознесенский А.А. Тепловые установки в производстве строительных материалов и изделий. М.: Изд-во литер. по строительству. 1964. 439с.
- [2] Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат. 1989. 352с.
- [3] Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат. 1981. 320с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Абрамов М.А., Бударин П.И., Панфилович К.Б.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: panfilovitch@kstu.ru

Структура большинства металлов в твёрдом состоянии изучена достаточно хорошо, в ходе исследований их разнообразных свойств уже накоплен большой экспериментальный материал, что нельзя сказать о жидких металлах и сплавах.

Тепловое излучение жидких металлов и сплавов исследовано мало. Не разработаны методы теоретических расчётов радиационных свойств жидких металлов и сплавов.

Тепловое излучение жидких металлов играет исключительную роль в различных теплообменных устройствах и химических аппаратах. В современной науке роль теплового излучения жидких металлов возрастает по мере возрастания температуры, рабочих параметров тел и сред. Одновременно возрастают требования к точности расчёта теплообмена излучением и определения свойств материала с целью обеспечения надёжности и высокой эффективности работы промышленных агрегатов.[1].

Основными элементами экспериментальной ячейки являются радиометр, резистивный нагреватель с исследуемым веществом, зеркало и модель черного тела, помещенные в вакуумную камеру. Камера изготовлена из нержавеющей стали X18H10T. В боковых стенках камеры имеются три окна диаметром 40 мм, выполненные из термостойкого стекла. Через окна проходят лучи от спектрофотометра, производится подсветка и осуществляется визуальный контроль состояния поверхности исследуемого расплава. Радиометр, токовводы, заслонка, вводы проводов радиометра и термопар смонтированы на крышке корпуса. Резистивный нагреватель может быть изготовлен из танталовой (вольфрамовой, молибденовой) ленты. В центре которой помещается исследуемый материал. Нагреватель крепится на охлаждаемых водой медных токовводах, которые были изолированы от крышки корпуса фторопластовыми кольцами. Резистивный нагреватель питается от сварочного трансформатора током промышленной частоты. Плавное регулирование напряжения, подаваемого на сварочный трансформатор, производится лабораторным автотрансформатором.

При измерении спектрального излучения луч от нагретого образца принимается зеркалом, расположенным строго под углом 45° как к ленте, так и к окну камеры, проходя через которое луч попадает в спектрофотометр, который регистрирует спектр излучения вещества.

Зеркало и радиометр крепятся на одной опоре, поворачивая которую, мы можем отвести зеркало от образца и подвести к нему радиометр, с помощью которого мы можем снять интегральную характеристику образца при тех же условиях.

Поток инфракрасного излучения от модели черного тела и исследуемого сплава регистрируется радиометром прямого видения без фокусирующей оптики. В качестве чувствительного элемента использовался термостолбик, собранный из десяти хромель-копелевых термопар, соединенных последовательно. Приемная площадка термостолбика

выполнена в виде звездочки и покрыта платиновой чернью. Холодные спаи термостолбика радиометра были прижаты к корпусу и изолированы от него кольцами из слюды.

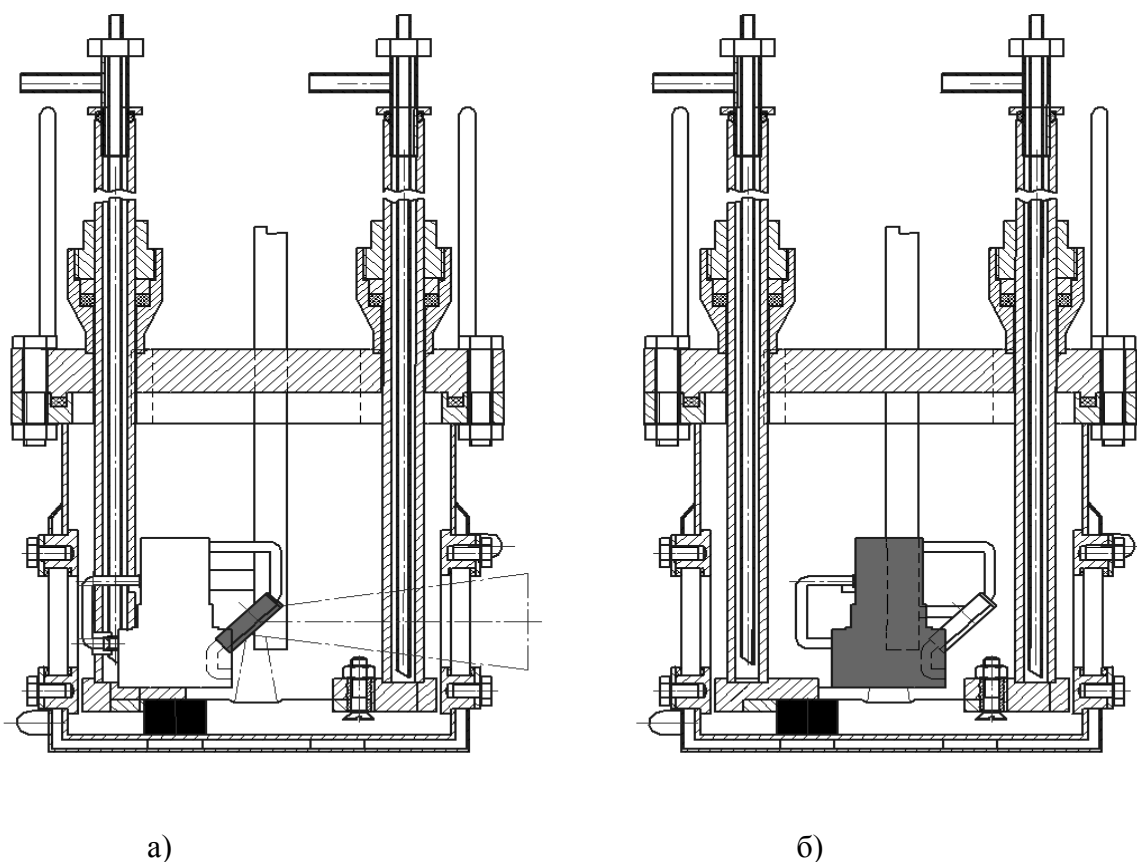


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки: а) измерение спектрального излучения; б) измерение интегрального излучения.

Размер образца примерно в полтора раза больше участка металла, от которого тепловое излучение попадает в радиометр. Поэтому при разных температурах и небольших неточностях настройки радиометра всегда виден образец исследуемого материала.

Подвижная заслонка, установленная между радиометром и исследуемым веществом, предназначалась для перекрытия "окна" радиометра между измерениями.

Экспериментальная ячейка вакууммируется высоковакуумным агрегатом АВП-100. Возможный обратный поток паров рабочей жидкости из диффузионного насоса удаляется азотной ловушкой ЛА-100. Измерение давления в ячейке проводится тепловым и ионизационным преобразователями.

Литература

- [1] Панфилович К.Б. Тепловое излучение и поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов: монография. Казань: Изд-во Казан.гос.технол.ун-та. 2009. 256с.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭТИЛЕНА

Косенков Д.В., Бударин П.И., Панфилович К.Б.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: panfilovitch@kstu.ru

Усовершенствование технологического оборудования в нефтехимическом производстве связано с использованием менее теплоемких процессов переработки сырья. Спект-

ральные коэффициенты поглощения органических веществ – один из параметров, необходимый для решения задач по оптимизации процессов теплообмена.

В качестве исследуемого вещества был выбран газообразный этилен. В настоящее время этилен является одним из основным видом сырья органического синтеза. Анализ литературы показал, что данные по спектрам пропускания этилена при повышенных давлениях отсутствуют.

На специально спроектированной экспериментальной установке [1] были получены спектры пропускания этилена в диапазоне давлений 1-5 МПа, при температуре 323 К, толщина исследуемого слоя $L=0,00015$ м.

По полученным спектрам рассчитаны спектральные коэффициенты поглощения.

На рисунке показана зависимость изменения спектральных коэффициентов поглощения этилена для одной полосы при $T=323$ К для различных давлений.

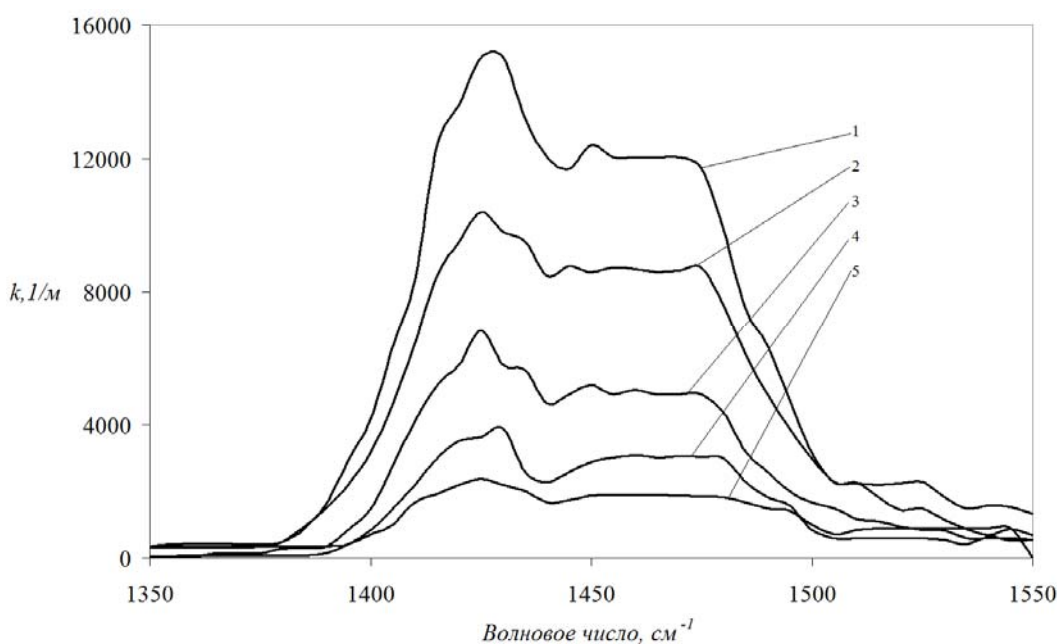


Рисунок. Спектральный коэффициент поглощения полосы этилена при давлениях: 1 – 5 МПа; 2 – 4,02 МПа; 3 – 3,04 МПа; 4 – 1,08 МПа; 5 – 0,5 МПа ($\omega=1450$ см⁻¹)

Видно, что с ростом давления спектральный коэффициент поглощения этилена возрастает, связано это с изменением плотности.

Располагая данными по радиационным характеристикам любого органического вещества и коэффициентами преломления можно рассчитать радиационную составляющую коэффициента теплопроводности [2], вклад которой достигает 10-20%.

Литература

- [1] Косенков Д.В., Бударин П.А., Панфилович К.Б. Установка для измерения ИК-спектров пропускания газообразных веществ при повышенных давлениях и температурах. *Казань: Вестник Казанского государственного технологического университета*. 2011. №22. С.36-40.
- [2] Аляев В.А., Панфилович К.Б. Радиационно-кондуктивный теплообмен в полупрозрачных органических жидкостях. *Казань: Изд-во Казан. ун-та*. 2003. 195с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГАЗОСТРУЙНОГО МИНИЭЖЕКТОРА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Пахомов Д.С., Иванов В.В., Палладиева Е.В., Абдрахманов Р.Н., Сагдеев Д.И.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: sagdeev@mail.ru

Струйными называются аппараты, в которых происходит смешение и обмен энергией двух потоков разных давлений с образованием смешанного потока с промежуточным давлением. В пароводяных инжекторах давление смешанного потока может превышать давление рабочего потока [1,2].

Смешиваемые потоки находятся в газовой (паровой) или жидкой фазе, или представляют собой смесь газа (пара), жидкости и твердых тел. Среда, находящаяся перед аппаратом при более высоком давлении, называется рабочей.

Рабочим называется поток рабочей среды. Рабочий поток выходит из сопла в приемную камеру струйного аппарата с большой скоростью и увлекает среду, имеющую перед аппаратом более низкое давление. Увлеченный поток называется инжектируемым. Как правило, в струйных аппаратах происходит сначала преобразование потенциальной или тепловой энергии рабочего потока в кинетическую энергию. Кинетическая энергия рабочего потока частично передается инжектируемому потоку. При протекании по струйному аппарату происходит выравнивание скоростей смешиваемых потоков и обратное преобразование кинетической энергии смешанного потока в потенциальную или тепловую.

Сборочный чертеж газоструйного миниэжектора для лабораторного стенда представлен на рис. 1. Основными элементами являются: сопло Лавалья, приемная камера, камера смешения, диффузор.

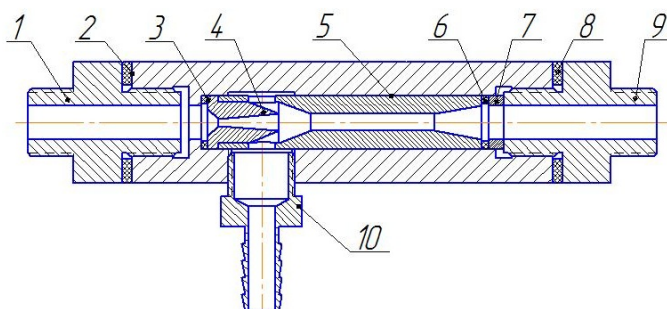


Рис. 1. Сборочный чертеж струйного аппарата. 1,9 – Подводящий и отводящий трубопроводы, соответственно; 2,3,6,8 – прокладки; 4 – сопло Лавалья; 5 – камера смешения с входным коллектором и диффузором; 7 – опорное кольцо; 10 – штуцер для откачки.

Потоки рабочей и инжектируемой сред поступают во входной коллектор, камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся, как правило, повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру.

Повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии является основным, принципиальным качеством струйных аппаратов. Благодаря этому качеству использование струйных аппаратов во многих отраслях техники позволяет получать более простые и надежные технические решения по сравнению с применением механических нагнетателей (компрессоры, насосы, газодувки, вентиляторы и др.) [3].

Основным достоинством эжектора, как струйного насоса, является отсутствие движущихся и трущихся деталей, что существенно при работе с горячими или агрессивными средами. Важным свойством является также техническая и технологическая простота

эжекторов, позволяющих создать устройства практически неограниченной производительности и высокой надежности, а также, низкая эксплуатационная стоимость и низкий уровень шума и вибрации, незначительный эрозионный и коррозионный износ.

В данной работе рассматривается газовый миниэжектор с набором сопел (коническим соплом и соплами Лаваля: профилированным и коническим) и цилиндрической камерой смешения. Вакуумная схема станда приведена на рис. 2.

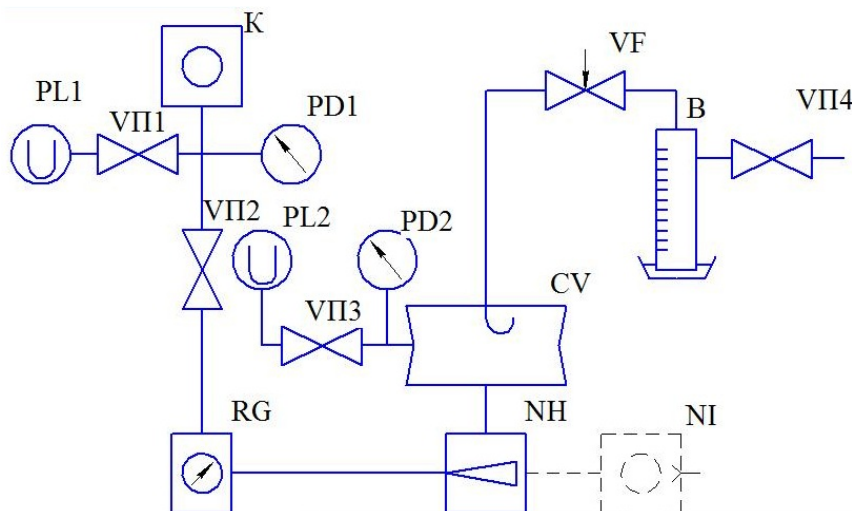


Рис. 2. Вакуумная схема лабораторного станда. NH — газоструйный эжектор; NI — механический насос (пылесос); RG — счетчик расхода газа; VP1, VP3 — краны U-образных вакуумметров; VP2 — кран регулирующий; PD1, PD2 — вакуумметры деформационные; PL1, PL2 — U-образные вакуумметры; CV — вакуумная камера объемом V; VF — натекатель; B — бюретка масляная; VP4 — кран бюретки; K — компрессор.

Работа эжектора предусматривает использование в качестве устройства заставляющего воздействовать на рабочее тело (воздух) компрессора и вакуумного насоса (пылесоса).

Основная трудность теоретического определения характеристик эжектора, состоит в сложности описания самого процесса турбулентного смешения струй, их взаимодействия в пространстве, ограниченного жесткими стенками.

В дальнейшей работе ставится цель усовершенствования лабораторного станда, который позволит выявить и уяснить закономерности процессов протекающих в простых эжекторах, а также критически оценить существующие в настоящее время в литературе расчетные методы газоструйных аппаратов [3-5]. Основной проблемой газоструйной откачки является повышение экономичности эжекторов, путем оптимизации процесса смешения, что достигается усложнением конструкции и одновременно с уточнением расчетных методов. В такой ситуации расчеты становятся сложными, а порой и невозможными, а это указывает на то, что следует опираться на качественно выполненные экспериментальные данные.

Спроектированный и изготовленный миниэжектор для лабораторного станда позволит продолжить студенческие научные исследования по исследованию работы газоструйного эжектора [6-8] в рамках дисциплины «Газодинамика сплошных сред». Данные исследования позволят закрепить теоретические знания, полученные при выполнении расчетного индивидуального задания «Расчет газоструйного эжектора» [1].

Литература

- [1] Сагдеев Д.И., Максимов Т.В. Газовая динамика сплошных сред: учебно-методическое пособие. М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань: КНИТУ. 2011. 156с.
- [2] Аркадов Ю.К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М.: Изд-во Физико-математической литературы. 2001. 336с.
- [3] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: «Наука». 1969. 824с.

- [4] Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат. 1989. 352с.
- [5] Матвеев П.С., Стабников В.Н. Струйные аппараты в пищевой промышленности. М.: Пищевая промышленность. 1980. 224с.
- [6] Рамздорф А.Ю., Габидуллин А.М., Гонежук Т.В., Щепакин Р.О., Михеев А.В., Альтапов А.Р., Сагдеев Д.И. Проектирование и изготовление лабораторного стенда для исследования работы газоструйного эжектора. Материалы Четвертой Российской студенческой научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология». 14-16 апреля 2009г. Казань: КГТУ. 2009. С.88-89.
- [7] Гайнутдинов И.И., Азаров Е.И., Сагдеев Д.И. Моделирование работы лабораторного газоструйного эжектора. Материалы шестой Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло- и массообменных процессов в химической технологии». 22-24 ноября 2010г. Казань: КГТУ. 2010. С.71-74.
- [8] Сырямин Д.Е., Азаров Е.И., Сагдеев Д.И. Моделирование гидродинамической обстановки в газоструйном эжекторе с использованием программного комплекса «FLUENT». Материалы Пятой Российской студенческой научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология». 14-16 апреля 2009г. Казань: КГТУ. 2009. С.88-89.

ДЕНИТРАЦИЯ ОТРАБОТАННОЙ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ ПРОДУКТАМИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Пискунова Д.С., Комаров В.А., Ким П.П.

Дзержинский политехнический институт, филиал Нижегородского государственного
технического университета имени Р.Е. Алексеева.

В производстве высокоэнергетических веществ возвращение отработанной серной кислоты (ОСК) возможно после её денитрации и концентрирования.

При денитрации ОСК в колонне водяным паром остаточное содержание оксидов азота и азотной кислоты составляет десятые доли процента, а денитрация паро-воздушной смесью с одноэлементным вихревым контактным устройством, работающим в струйно-центробежном режиме, позволяет снизить до сотых долей. При такой остаточной массовой доле связанного азота в денитрированной кислоте содержание их в отходящих газах после концентратора превышает санитарную норму, что вынуждает предусмотреть дополнительную очистку отходящих газов концентрирования от них.

Табл. 1. Значение энергии Гиббса

Продукты реакции	$-\Delta G_T^0$, кДж/моль					
	298 К			403 К		
	HNO ₃	N ₂ O ₃	HNO ₂	HNO ₃	N ₂ O ₃	HNO ₂
	изооктан					
N ₂ , CO ₂	568	723	391	437	599	281
N ₂ O, CO ₂	411	460	685	294	382	137
NO, CO ₂	269	177	91	180	156	24
N ₂ , CO	515	712	212	359	576	234
N ₂ O, CO	368	418	320	231	320	106
NO, CO	237	156	80	134	125	9
	Цетан					
	N ₂ , CO ₂	585	778	396	602	791
	N ₂ O, CO ₂	412	461	232	426	469
	NO, CO ₂	270	178	127	291	198
	N ₂ , CO	424	714	127	447	736
	N ₂ O, CO	920	719	212	390	440
	NO, CO	914	156	81	264	180

Табл. 2. Результаты денитрации кислоты, содержащей 0,13% N_2O_3 и 0,061% HNO_3 , продуктами первичной переработки нефти

№ опы- та	Вре мя, мин	Темпера-тура °С	Содержание ·10 ⁴ , % масс		Соотношение цетана или изооктана к, г	
			N ₂ O ₃	HNO ₃	N ₂ O ₃	HNO ₃
Дизельное топливо с цетановым числом 45						
1	30	120	800	320	0,18:1	0,37:1
2	30	120	700	150	0,27:1	0,56:1
3	30	130	90	30	0,18:1	0,37:1
4	30	130	10	5	0,27:1	0,56:1
5	10	160	10	4	0,18:1	0,37:1
6	20	160	<1	1	0,18:1	0,37:1
7	30	160	<1	<1	0,18:1	0,37:1
8	10	160	<1	1	0,27:1	0,55:1
9	20	160	<1	<1	0,27:1	0,55:1
10	10	170	<1	1	0,18:1	0,37:1
11	20	170	<1	<1	0,18:1	0,37:1
12	10	160	150	60	0,1:1	0,2:1
13	10	170	50	40	0,1:1	0,2:1
14	10	160	1	1	0,35:1	0,75:1
15	10	170	<1	<1	0,35:1	0,75:1
16	20	160	<1	<1	0,22:1	0,47:1
Бензин А-72 , (ГОСТ 2084-77)						
1	30	120	850-	400	0,18:1	0,18:1
2	30	120	720	190	0,27:1	0,27:1
3	30	130	120	50	0,18:1	0,18:1
4	30	130	20	13	0,27:1	0,27:1
5	10	160	15	9	0,18:1	0,18:1
6	20	160	<1	2	0,18:1	0,18:1
7	30	160	<1	<1	0,18:1	0,18:1
8	10	160	<1	1,5	0,27:1	0,27:1
9	20	160	<1	<1	0,27:1	0,27:1
10	10	170	<1	1,3	0,18:1	0,18:1
11	20	170	<1	<1	0,18:1	0,18:1
12	10	160	210	130	0,1:1	0,1:1
13	10	170	90	70	0,1:1	0,1:1
14	10	160	1,6	1,9	0,35:1	0,35:1
15	10	170	<1	<1	0,35:1	0,35:1
16	20	160	<1	<1	0,22:1	0,22:1

Глубокая денитрация, обеспечивающая требуемую степень очистки ОСК, возможна при добавке различных денитрирующих агентов, восстанавливающих соединения азота.

Термодинамический анализ взаимодействия оксида азота(III) и азотной кислоты с изооктаном и цетаном показал, что, судя по величине энергии Гиббса, предпочтительнее протекание реакции с восстановлением соединений азота до элементного азота и окисления углерода до оксида углерода(IV) (таблица 1).

Изучен процесс денитрации кислоты, содержащей 0,13% N_2O_3 и 0,061% HNO_3 , бензиновой и соляровой фракциями. Были испытаны неэтилированный бензин А-72 (ГОСТ 2084-77), в количестве 0,18-0,27 г на 1 г оксида азота(III) и 0,18-0,27 г на 1 г азотной кислоты в пересчете на изооктан, дизельное топливо с цетановым числом 45 (ГОСТ 305-82) в количестве 0,18-0,27 г на 1 г оксида азота(III) и 0,37-0,56 г на 1 г азотной кислоты в пересчете на цетан при температуре 130-170 °С. Указанное соотношение реагентов и соединений азота и температуры позволяет снизить продолжительность денитрации до 10-30 мин. Интен-

сификация и увеличение скорости процесса в указанном интервале соотношений реагентов и соединений азота и температур позволяет устранить продувку горячим воздухом или паром, а также разбавление водой (табл. 2).

Уменьшение температуры ниже 130 °С нецелесообразно ввиду существенного ухудшения степени денитрации, увеличение температуры выше 170 °С при атмосферном давлении невозможно, т.к. температура кипения исследуемой кислоты при атмосферном давлении составляет около 170°С. Уменьшение соотношения бензиновой фракции ниже 0,18 г на 1 г оксида азота(III) и азотной кислоты в пересчете на изооктан и соляровой фракции ниже 0,18 г на 1 г оксида азота(III) и 0,37 г на 1 г азотной кислоты в пересчете на цетан нежелательно ввиду значительного снижения степени очистки (опыты 12-13). Увеличение соотношения бензиновой фракции выше 0,27 г на 1 г оксида азота(III) и азотной кислоты в пересчете на изооктан, а соляровой фракции выше 0,27 г на 1 г оксида азота(III) и 0,56 г на 1 г азотной кислоты в пересчете на цетан не приводит к существенному улучшению показателей процесса денитрации.

В указанном интервале соотношения продуктов первичной переработки нефти к соединениям азота, температур процесс денитрации существенно интенсифицируется и экономически наиболее целесообразно.

Результаты денитрации в непрерывном режиме при среднем времени пребывания реагентов в реакторе 20-30 мин также подтвердили высокую эффективность продуктов первичной переработки нефти (табл. 3).

Использование предлагаемого способа обеспечивает по сравнению с известными такие же преимущества, как при использовании аддуктов *n*-парафинов с карбамидом.

Табл. 3. Результаты денитрации кислоты в непрерывном режиме парами продуктов первичной переработки нефти

№ опыта	Температура, °С	Содержание ·10 ⁻⁴ , % масс.			Соотношение изооктана или цетана к, г/г	
		N ₂ O ₃	HNO ₃	сум. в пересчете на HNO ₃	N ₂ O ₃	HNO ₃
Дизельное топливо с цетановым числом 45						
1	130	0,32	0,27	0,48	0,27	0,56
2	130	0,32	0,29	0,49	0,22	0,46
3	140	0,33	0,29	0,50	0,18	0,37
1	2	3	4	5	6	7
4	140	14	9	19	0,15	0,30
5	130	0,32	0,28	0,49	0,30	0,60
Бензин А-72						
6	140	0,31	0,29	0,48	0,27	0,27
7	140	0,32	0,30	0,50	0,22	0,22
8	150	0,33	0,27	0,49	0,18	0,18
9	150	12	8	17	0,15	0,15
10	140	0,31	0,28	0,48	0,30	0,30

Хроматографическим анализом газовой фазы установлено, что основным продуктом взаимодействия продуктов первичной переработки нефти с соединениями азота является элементный азот.

При такой степени денитрации в отходящих газах концентрирования денитрированной кислоты будет отсутствовать оксиды азота и азотной кислоты.

ПУТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСОСНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Кузьмичева Ю.О., Фурсов В.К.

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет.

E-mail: office@knastu.ru

Известно, что насосное оборудование является одним из самых энергоемких в любой стране, причем, чем более развитая страна, тем выше удельный вес потребляемой насосами энергии.

В различных отраслях промышленности энергопотребление насосов составляет в среднем:

- в нефтяной промышленности – до 59%;
- в химической – до 31%;
- в водоснабжении и водоотведении – до 50%.

Известно также, что снижение потребляемой энергии является сегодня ключевой задачей мирового сообщества. В частности, вышедшая в 2007 году Директива Евросоюза по этому вопросу предусматривает снижение общего энергопотребления в странах Европы к 2020 году на 20%. Причем снижение энергопотребления насосным оборудованием предусматривается на уровне 40% в сочетании с одновременным решением экологических проблем. Для России такая задача является особо актуальной, учитывая многопрофильность ее экономики (нефтегазотранспортная система, нефтеперерабатывающая, химическая и металлургическая промышленности, энергетика, водоснабжение и т.д.) и чрезмерную энергозатратность большинства отраслей (в 2-4 раза) по сравнению с уровнем развитых стран.

Задача по существенному (на 40%) снижению энергопотребления насосным оборудованием является задачей комплексной, учитывающей все потери энергии по пути от источника энергии до потребителя. Очевидно, что под потребителем следует подразумевать жидкость (воду, нефть и пр.), которой сообщается механическая энергия, требуемая для осуществления того или иного технологического процесса.

В таблице приведен перечень направлений энергосбережения и оценка их влияния на энергопотребление по материалам Europtm, из которых видно, что разработчики вполне справедливо видят потенциальные возможности экономии потребляемой энергии за счет собственно насоса, широкого регулирования режимов его работы в соответствии с запросами потребителя и программируемого согласования энергетических характеристик насосных агрегатов и сети.

В приведенной таблице явно просматривается намерение обеспечить экономию только электрического вида энергии (в таблице везде указан электромотор в качестве приводного двигателя). Однако известно, что самой электрической энергии предшествуют огромные потери энергии первичных энергоресурсов (нефть, газ, ядерная энергия и др.), которые составляют в лучшем случае 60-65%. С точки зрения общепланетарного энергопотребления такой подход является неполным, т.к. создатели насосных агрегатов могут в ряде случаев выбирать тип привод, более приближенный к первичным источникам энергии. Поэтому необходимо более точно конкретизировать эти направления и предложить более детальную программу достижения поставленной цели.

Приведенные в таблице прогнозные пути снижения энергопотребления и возможные достижения по каждому направлению являются весьма укрупненными и недостаточно обоснованными. Стратегию достижения этой цели более целесообразно представить в виде блок-схемы (рисунок).

Как видно из приведенной блок-схемы, стратегия обеспечения существенного уменьшения энергопотребления насосным оборудованием базируется на комплексном подходе к поиску и реализации резервов экономии энергии во всех звеньях цепочки энергопередачи от источника до перекачиваемой жидкости.

Табл. 1. Направления энергосбережения

Насос	Насосный агрегат с дополнительным оборудованием	Система
- Создание максимально эффективных насосов. - Повышение эффективности действующих насосов с помощью сменных роторов, подрезок рабочих колес и др. - Снижение энергопотребления – 3%.	- Регулирование режимов работы насосов с помощью частотного привода. - Создание интеллектуальных систем управления и контроля. - Снижение энергопотребления – 20%. - Повышение качества монтажа, пусконаладки, обслуживания. - Снижение энергопотребления – 3%	- Оптимизация всей системы. - Снижение энергопотребления – 10%. - Согласование параметров сети и насоса. - Снижение энергопотребления – 4%.

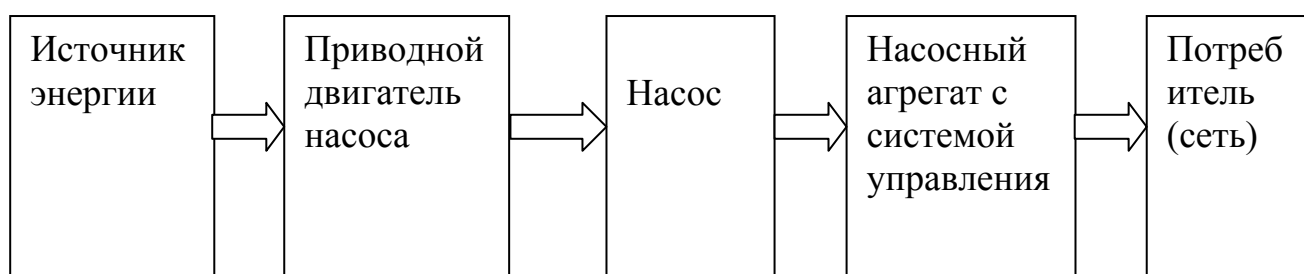


Рисунок. Блок-схема стратегии энергосбережения

Но для обеспечения дальнейшего прогресса в насосостроении и его применении следует уже сейчас, не считаясь ни с какими затратами, резко увеличивать инвестиции в НИР и ОКР для поиска, исследований, подготовки к внедрению новых идей, принципов и механизмов в этой отрасли техники, так как на старом багаже продержаться достаточно долго не удастся.

СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПОЧНОГО МАЗУТА

Литвак А.В., Фурсов В.К.

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет.

E-mail: office@knastu.ru

Состав, структура и свойства топочных мазутов зависят от качества исходной нефти, технологии ее переработки, условий хранения и транспортирования, подготовки топлива к сжиганию, и не являются постоянными. Разнообразные соединения, входящие в состав мазута, формируют его структуру как многофазную дисперсную систему, состоящую из структурных высокомолекулярных комплексов (углеводородные полициклические и асфальто-смолистые соединения, карбены, карбоиды, металлоорганические и различные механические включения).

С углублением переработки нефти, с целью получения большего количества светлых продуктов, ухудшается качество топочного мазута: повышается его вязкость и температура

вспышки, увеличивается содержание смолисто-асфальтеновых веществ, металлов, примесей. Использование вязких и тяжелых мазутов сопряжено со значительными сложностями как при хранении, так и при распылении для сжигания. Неоднородная структура топочного мазута является одной из главных причин целого ряда эксплуатационных проблем при сжигании топлива в котельных: пульсации факела в топке, срыва горения, неустойчивая работа топливных насосов, загрязнение мазутных фильтров и топливной арматуры, коксование форсунок, сажеобразование. Кроме того, происходит повышенный выброс вредных веществ с продуктами сгорания: оксидов азота, диоксида серы, продуктов химнедожога, бенз(а)пирена, загрязнение окружающей среды сбросными водами, содержащими нефтепродукты.

В процессе длительного хранения мазута происходит его «старение», испаряются легкие фракции, что приводит к повышению вязкости и температуры вспышки. Сжигание такого мазута является вредным и даже невозможным. Кроме того, техническое состояние системы мазутоподготовки из-за изношенности оборудования и недостаточной технической вооруженности котельных не позволяет прогреть мазут до минимальной температуры 90 °С, необходимой для сжигания. Это приводит к тому, что форсунки не обеспечивают необходимого распыления мазута. А это, в свою очередь, приводит к большому химическому и механическому недожогу топлива, а в конечном итоге к перерасходу мазута и увеличению вредных выбросов.

Проблемы энерго-ресурсосбережения и экологической безопасности при работе энергетических топливных установок в условиях роста цен на энергоносители определяют направления социального развития России в целом, а для регионов с ограниченными транспортными возможностями эти проблемы являются основой выживаемости.

Наиболее удачным решением этих проблем в мировой практике является использование в качестве котельного топлива водо-мазутных эмульсий (ВМЭ) – нового жидкого синтетического топлива, образованного путем тепломассоэнергообменной «сшивки» воды с жидкими энергоносителями. Для получения мелкодисперсной ВМЭ предлагается использовать диспергатор мазута, обеспечивающим гидромеханическую обработку топлива для качественного улучшения структуры и однородности мазута. Отличительной особенностью этого изобретения является простота конструктивного решения, так как отсутствуют движущиеся и трущиеся части, возможность изготовления узлов и деталей устройства на обычном универсальном оборудовании, а установка диспергатора сводится к несложным монтажным работам по его врезке в штатную линию топливоподготовки.

Диспергатор мазута (ДМ) изготавливается на агрегатной базе центробежных насосов с производительностью по мазуту от 2 до 60 т/ч. Принцип действия диспергатора, устанавливаемого в системе топливоподготовки или системе подачи топлива, основан на кавитационной переработке смеси мазута и воды с преобразованием их в гомогенную, мелкодисперсную (1-3 мкм), стойкую водо-мазутную эмульсию, сохраняющую свои свойства после замораживания (размораживания) и имеющую при сжигании на стандартном оборудовании более высокие энергетические показатели. Устройство работает следующим образом: при движении жидкости она разделяется на два потока, которые, имея вращательное движение в противоположные стороны, попадают в вихревую камеру, образуя вихревой слой. В непрерывном потоке в вихревой камере образуется множество каверн, при захлопывании которых генерируется мощное акустическое поле, волны которого входят в концентратор, где акустическое поле, ограниченное сравнительно небольшим объемом внутри параболической полости, усиливается и под его воздействием обеспечивается качественное диспергирование жидкости. При этом качественно улучшается структура и однородность мазута, его физико-механические свойства, что приводит к повышению эффективности его сжигания (особенно мазутов плохого качества), стабильной работе котлоагрегатов.

Кавитационный процесс в пассивном гидродинамическом диспергаторе реализован таким образом, что все ударно-волновые явления происходят непосредственно в потоке

жидкости, не затрагивая материала корпуса и элементов реакционной камеры, чем обеспечивается долговечность конструкции диспергатора.

В процессе точечного ударно-волнового воздействия происходят структурные и молекулярные изменения в сложных молекулах, агломератах и глобулах, изначально присутствующих в перекачиваемой жидкости, а также разрушение органических и минеральных примесей.

Процессы тепло и массопереноса, сопровождающие кавитацию, а также струйные течения, возникающие далее в потоке жидкости, приводят к интенсивному перемешиванию и диспергированию многокомпонентных несмешиваемых жидкостей и твердых включений с образованием однородных и стойких к расслоению тонкодисперсных эмульсий и суспензий. Таким образом, после кавитационной обработки мазут, имеющий в исходном состоянии неоднородную «комковатую» структуру (что характерно для мазутов длительного хранения) и плохую способность к перекачиванию, фильтрации, тонкому распылению форсунками и надежному горению, преобразуется в однородную субстанцию, у которой указанные свойства соответствуют нормативным требованиям.

Гидродинамическая кавитационная обработка мазутов может быть осуществлена непосредственно на топливосжигающих объектах с использованием штатного оборудования систем циркуляции и нагнетания мазута к горелочным устройствам.

Место установки диспергатора ДМ в мазутном хозяйстве – на участке между расходной топливной емкостью и штатными мазутными насосами после фильтров грубой очистки (рисунок). Поэтому его производительность должна быть не меньше производительности подающего мазутного насоса. Установка диспергатора перед мазутными насосами значительно повышает надежность их работы, так как предотвращает крупных водяных включений в рабочие органы насосов. Кроме того, установка диспергатора мазута позволяет утилизировать загрязненные мазутом воды путем дозированной добавки к топливу. В этом случае вода подмешивается к основному потоку мазута в предварительном смесителе, который устанавливается непосредственно перед ДМ. Количество дозируемой воды устанавливается при наладке системы и теплотехнических режимов таким образом, чтобы обеспечить оптимальную влажность сжигаемой водо-мазутной эмульсии (ВМЭ). Текущий контроль влажности ВМЭ ведется с помощью проточного анализатора влажности мазута с возможностью автоматического регулирования ее значения.

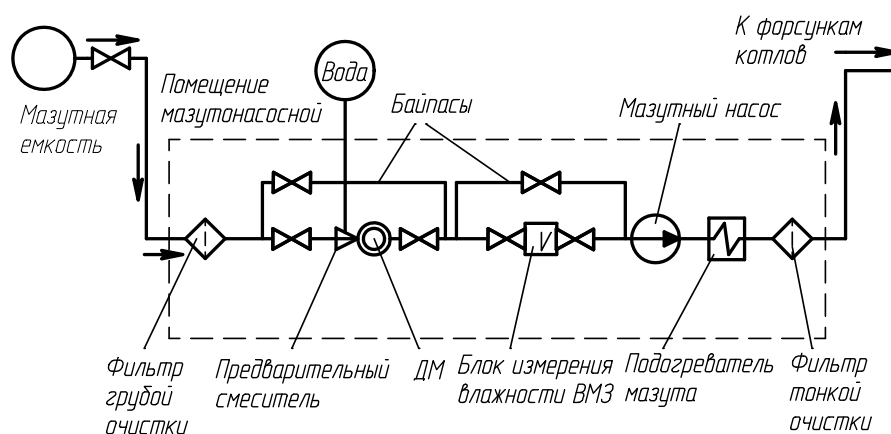


Рисунок. Схема подготовки водо-мазутной эмульсии

Переход на использование в топливосжигающих установках водо-мазутных эмульсий (взамен традиционных мазутов) дает следующие преимущества:

- существенно упрощается технология и снижаются энергозатраты на подготовку топлива к сжиганию, появляется возможность создания бессточных мазутных хозяйств, исключаящих сбросы замасленных вод в окружающую среду;

- хранение ВМЭ в мазутных емкостях может осуществляться при значительно более низких температурах по сравнению с регламентом длительного хранения традиционных мазутов, что обеспечивает экономию тепловой энергии на поддержание температурных условий хранения топлива, сохранение его качественных характеристик, поддерживается его способность к воспламенению в топке и т.д.;

- продлеваются сроки длительного хранения мазута в качестве резервного топлива до 10-15 лет;

- обеспечивается высокая полнота сгорания топлива на режимах со сверхмалыми избытками подачи воздуха;

- появляется возможность снижения температур подогрева мазута перед его подачей на сжигание с 100-120 °С до 65-70 °С;

- использование ВМЭ в топливных установках повышает экологическую безопасность котельных установок и надежность работы оборудования, экономит углеводородные топлива на 20-40%, снижает выброс оксидов азота на 20-30%, сажистых частиц и продуктов химнедожога в 2-3 раза, диоксида серы на 20-50%, уменьшает нагароотложение на поверхностях нагрева котлов, повышает КПД котельных установок на 0,5-2,5%.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ЭКСТРАКЦИИ МЕТАНОЛА ИЗ ОДИНОЧНЫХ КРУПНЫХ КАПЕЛЬ СМЕСИ ЕГО С *n*-ГЕКСАНОМ

Камаев А.С., Гаврилов Н.А., Романовский А.А.

Ангарская государственная техническая академия.

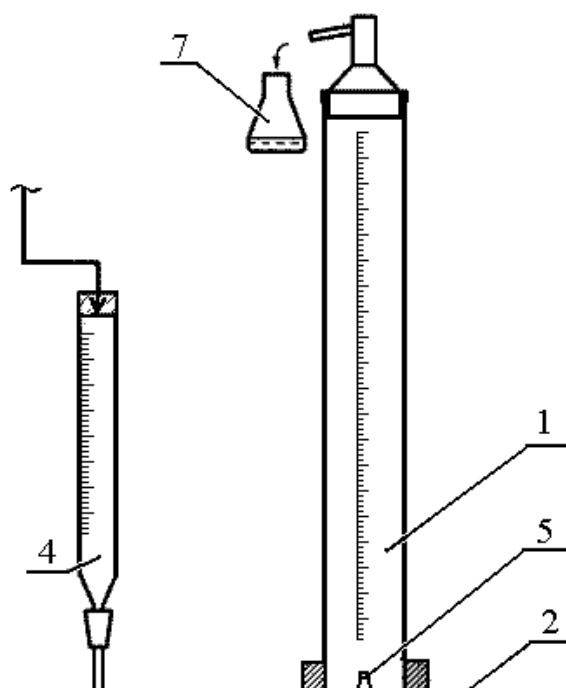


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. (1 – колонка; 2 – фторопластовое кольцо; 3 – кран; 4 – мерная бюретка; 5 – сопло; 6 – регулировочный вентиль; 7 – сборник рафината)

Процессы массообмена, имеющие важное значение в химической технологии, в большинстве своем, характеризуются значительной продолжительностью. В связи с этим, большое значение приобретает интенсификация их с помощью различных физических воздействий.

В литературе [1, 2] описаны примеры использования ультразвуковых колебаний в процессах жидкостной экстракции.

Нами были выполнены опыты по экстракции метанола водой из одиночных капель смеси его с *n*-гексаном. Экспериментальная установка (рис. 1) включала в себя полуэкстракционную колонку диаметром 50 мм, оборудованную системой подачи дисперсной фазы и системой отбора проб.

Для наложения на систему акустических колебаний в днище колонки располагался магнитострикционный преобразователь, который питался от ультразвукового генератора мощностью 100 Вт и частотой 22 кГц.

С целью удобства отбора проб высота рабочей части колонки регулировалась путем установки труб разной длины и составляла 0,14; 0,26; 0,5; 1,0; 1,5 м. Анализ проб выполнялся на хроматографе модели “Цвет-200” методом внутреннего стандарта. Концентрация метанола в исходной смеси во всех опытах была одинаковой и составляла $\bar{y}_H = 0,039$ масс. доли.

Было установлено, что размер капель d_K мало зависел от скорости истечения и в основном определялся диаметром отверстия сопла. С помощью видеокамеры, расположенной на подъемном устройстве, фиксировалась форма капель, а также скорость их всплывания. После отрыва от отверстия крупные капли диаметром от 5 до 7 мм принимали форму сплюсненного сфероида и быстро достигали предельной скорости $w \approx 0,16$ м/с.

Наложение акустических колебаний указанной мощности не оказывало заметного влияния на размер капель и скорость их всплывания.

На рис. 2 для одной из серий показано изменения концентрации метанола на выходе из колонок разной высоты при свободном всплывании капель. Видно, что имеет место монотонное уменьшение концентрации метанола с увеличением высоты слоя воды в колонке. Экстраполирование этой кривой к высоте $H = 0$ не приводит к концентрации метанола в исходной смеси, а соответствует некоторой концентрации $\bar{y}_0 < \bar{y}_H$.

Разность концентрации $(\bar{y}_H - \bar{y}_0)$ обусловлена, так называемыми, входными эффектами, связанными с формированием капель при истечении жидкости из сопла и с коалесценцией их при выходе из сплошной фазы.

Наложение акустических колебаний приводило к более глубокому исчерпыванию метанола. На рис. 2 показано изменение концентрации метанола при воздействии ультразвука.

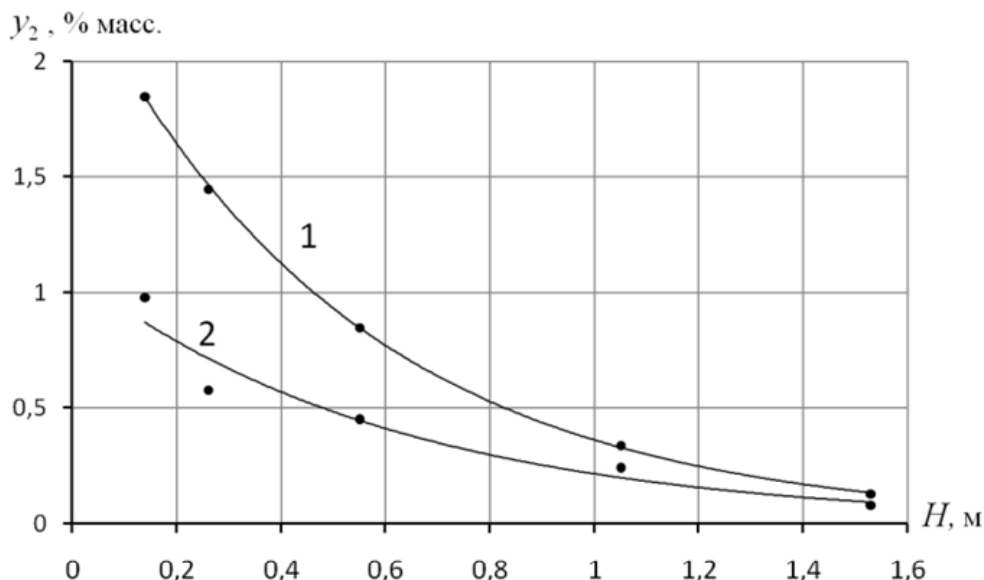


Рис. 2. Зависимость концентрации метанола на выходе из колонки от высоты слоя воды при свободном всплывании капель(1) и при воздействии ультразвука (2) (диаметр сопла $d_0=3$ мм; $d=6,2$ мм; $w=0,16$ м/с)

Анализ полученных результатов позволил установить, что наблюдаемое повышение степени извлечения метанола при воздействии ультразвука, в основном, связано со стадией формирования капли.

Скорость массообмена в период установившегося движения капель, по нашим оценкам, мало зависел от наложения на систему акустических колебаний.

Литература

- [1] Гинстлинг А.М., Барам А.А. Ультразвук в процессах химической технологии. Л.: Государственное научно-техническое издание химической литературы. 1960.
- [2] Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия. 1990.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАПЕЛЬНОГО КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ГОРЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Васильев П.С., Рева С.Л.

Волгоградский государственный технический университет. E-mail: pahp@vstu.ru

Испарение и обратный ему процесс конденсации широко распространено как в естественных условиях, так и в различных технологиях переработки веществ, являясь как основным процессом, так и сопутствующим, совмещенным с теплообменом, гидравликой, химическими реакциями. Испарение применяется в технике как средство разделения жидких смесей или очистки веществ. Оно лежит в основе пароэнергетики, работы холодильных, выпарных и других установок, а также всех процессов сушки материалов.

В связи с тем, что испарение является энергозатратным процессом, то исследование процесса испарения, анализ условий проведения технологических процессов и конструктивного исполнения аппаратов для выявления путей интенсификации процесса и повышения его эффективности, является весьма актуальным.

Анализ литературных источников и наш опыт экспериментальных исследований показывает, что одним из направлений интенсификации процесса испарения является переход от испарения жидкости в большом объеме или испарения при пленочном течении жидкости к испарению в режиме кипения жидкости, подаваемой на поверхность нагрева в виде капель – капельному кипению.

Испарение капли на поверхности нагрева было предметом изучения многих авторов, однако установление закономерностей, позволяющих провести расчет в условиях капельного кипения, и в настоящее время является актуальной задачей.

Для исследования процесса кипения капли на поверхности нагрева, имеющей температуру выше температуры кипения испаряемой жидкости, была разработана и создана экспериментальная установка [1].

Экспериментальная установка для исследования капельного кипения включает в себя аппарат с обогреваемой поверхностью, которая представляет из себя плоскую пластину из углеродистой стали размером 553×82×8 мм. Поверхность пластины дополнительно специально не обрабатывалась и имела шероховатость, соответствующую листовому прокату. Температура поверхности измерялась хромель-копелевыми термопарами, ЭДС которых измерялась с точностью до десятых долей милливольт высокоточными электронными милливольтметрами ИРТ 1730D и контролировалась инфракрасным термометром – пирометром АКИП-9302, позволяющим проводить измерения бесконтактным способом. Картина поведения капли и время испарения определялись с помощью высокоскоростной видеокамеры VS-FAST/G6 с максимальной частотой съемки до 5000 кадров в секунду. Видеокамера связана с монитором компьютера, на экране которого с необходимой детализацией и точностью наблюдалась вся картина процесса испарения, с которой можно было производить различные манипуляции: останавливать кадр, осуществлять покадровый просмотр, возвращаться к любому интересующему моменту, увеличивать и переворачивать изображение, записывать на компьютере видео и фотоизображение процесса. Эти возможности позволяли с высокой точностью измерять время протекания процесса и необходимые линейные размеры.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении, использовались капли дистиллированной воды. Начальная температура воды составляла 20°C. Высота падения капли изменялась, начиная с $h=40$ мм и до $h=400$ мм. Размеры капель, которые определялись как среднестатистические весовым методом, составляли: $d_k=2,567$ мм; $d_k=2,800$ мм; $d_k=3,783$ мм; $d_k=4,234$ мм; $d_k=4,840$ мм; $d_k=5,692$ мм. Температура поверхности нагрева изменялась в пределах от 100°C до 270°C с интервалом 10-20°C.

Использование такого технического оснащения экспериментальной установки позволило детально выяснить физическую картину поведения кипящей капли жидкости на поверхности нагрева [2].

При падении капли на поверхность с некоторой высоты с ней происходят следующие изменения. В начальный момент контакта с поверхностью, капля как бы «расплющивается» и приобретает форму близкую к тороиду со сплошной пленкой жидкости внутри тороида. Далее она под действием силы поверхностного натяжения трансформируется и приобретает вид приплюснутой полусферы с определенным диаметром пятна контакта с поверхностью нагрева. Затем происходит процесс кипения жидкости в основном объеме капли, более или менее бурный в зависимости от температуры поверхности нагрева. Необходимо отметить, что этот период характеризуется активным парообразованием как на поверхности нагрева, так и по всему объему жидкости. При этом площадь пятна контакта капли с поверхностью нагрева остается примерно постоянной. После испарения основного объема жидкости на поверхности остается влажное пятно. Последний этап характеризуется постепенным полным высыханием влажного пятна, причем испарение идет с поверхности пленки жидкости.

При температурах поверхности нагрева, для воды равных примерно 240-260 °С, капля жидкости перестает контактировать с поверхностью и стягивается в сфероид, начинающий хаотично двигаться по ней. В зависимости от температуры перегрева поверхности и высоты падения капли может образовываться как один, так и несколько более мелких сфероидов. В этом случае испарение жидкости идет с поверхности сфероида без наличия центров парообразования внутри его.

Использование компьютерной техники дало возможность измерять как геометрические размеры поверхности контакта кипящей капли жидкости с поверхностью нагрева, так и время испарения, составляющее при максимальной интенсивности процесса порядка 0,2-0,5 сек. и позволило предложить методику обработки экспериментальных данных, представленную в [3].

Полученные результаты показали высокую эффективность процесса испарения, проводимого в режиме капельного кипения. Значения коэффициентов теплоотдачи для среднеинтегральной площади пятна контакта, соответствующие всему периоду испарения, причем с учетом периода прогрева капли до температуры кипения, лежат в районе 30000 Вт/(м²·К), максимальные коэффициенты теплоотдачи, соответствующие непосредственно периоду кипения, достигают значений 60000 Вт/(м²·К) и выше, а значения удельного теплового потока составляют порядка 2 МВт/м² [2, 3, 4].

Необходимо отметить, что в малом объеме капли пленочный режим кипения, соответствующий первому кризису кипения, в связи с отсутствием ограничивающих стенок аппарата не развивается во всем диапазоне температурного напора вплоть до значений соответствующих переходу капли в сфероидальное состояние. В связи с этим появляется возможность осуществления процесса испарения при очень больших значениях температурного напора и удельного теплового потока вплоть до значений, соответствующих второму кризису кипения, избегая крайне нежелательных технологических последствий, связанных с резким падением коэффициентов теплоотдачи, перегревом теплообменных поверхностей, «паровым взрывом», что может быть особенно важным для пароэнергетики.

Исходя из результатов экспериментальных исследований, нами были предложены принципиальные схемы конструкций аппаратов с использованием капельного кипения [5, 6, 7].

Литература

- [1] Рева С.Л., Рева Л.С., Голованчиков А.Б. Экспериментальная установка для исследования процесса капельного испарения. *Волгоград: Известия ВолгГТУ. 2011. Вып.4. №1. С.40-43.*
- [2] Рева С.Л., Васильев П.С., Рева Л.С., Голованчиков А.Б. Экспериментальное исследование испарения капли с поверхности нагрева. *Инновационные наукоемкие технологии: теория, эксперимент и практические результаты: докл. междунар. науч.-практ. конф. РХТУ им. Д.И. Менделеева, Тульский гос. ун-т. Тула. 2010. С.24-28.*
- [3] Рева С.Л., Васильев П.С., Рева Л.С., Голованчиков А.Б. Методика обработки экспериментальных исследований капельного кипения. *Известия ВолгГТУ. Волгоград: ВолгГТУ. 2012. Вып.5. №1. С.42-45.*

- [4] Рева С.Л., Васильев П.С., Рева Л.С., Голованчиков А.Б. Интенсификация тепло- и массообмена при капельном кипении жидкости. XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Волгоград, 25-30 сент. 2011 г.). *Волгоград*. **2011**. С.500.
- [5] Рева С.Л., Рева Л.С., Голованчиков А.Б. П. м. 107960 РФ, МПК 7 B01D1/00. заявитель и патентообладатель Гос. образ. учрежд. Волгград. гос. техн. ун-ет. №2011109599/05; заявл. 14.03.2011; опубл. 10.09.2011. Бюл. №25.
- [6] Васильев П.С., Рева С.Л., Рева Л.С., Голованчиков А.Б., Магомедова Э.А., Ломоносова И.В. Заявка на п. м. №2011150379 РФ, МПК B01D1/00. заявитель и патентообладатель Гос. образ. учрежд. Волгград. гос. техн. ун-ет.; заявл. 09.12.2012; решение о выдаче патента 02.02.2012.
- [7] Голованчиков А.Б., Рева Л.С., Рева С.Л., Васильев П.С. Заявка на п. м. №2011146569 РФ, МПК B01D1/00. заявитель и патентообладатель Гос. образ. учрежд. Волгград. гос. техн. ун-ет.; заявл. 16.11.2011; решение о выдаче патента 23.01.2012.

РЕКОНСТРУКЦИЯ БЛОКА СТАБИЛИЗАЦИИ УСТАНОВКИ КОМПЛЕКСНОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ

Насибуллин Р.Р., Лукин В.О.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: gamzatzakirov@yandex.ru

Выбор эффективной схемы производства широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) при подготовке нефти определяет в значительной степени затраты на установке комплексной подготовки нефти (УКПН). В основе производства ШФЛУ на УКПН лежит процесс стабилизации нефти. Стабилизация – это процесс удаления из нефти низкомолекулярных углеводородов на промыслах с целью сокращения потерь от испарения и улучшения условий транспортирования.

В настоящее время разработан ряд способов стабилизации нефти, основанных на схемах ректификации, сепарации и имеющих определенные особенности по узлам подвода и отвода материальных и тепловых потоков. Из всех известных способов на промыслах эксплуатируются практически три технологические схемы [1]:

1. Проектная схема института Гипростокнефть с циркуляцией кубовой жидкости через печь для подвода тепла в колонны.
2. Схема стабилизации в укрепляющей колонне.
3. Схема стабилизации нефти ректификацией в двух колоннах.

В блоке стабилизации нефти Азнакаевской УКПН используется третья схема - ректификация нефти в двух колоннах, причем одна колонна работает, в основном, на паровом потоке сырья, а во вторую поступает жидкая часть из сепаратора.

В данной схеме обезвоженная и обессоленная нефть, подогретая в теплообменниках Т-1 до температуры 120-140°C за счет тепла отходящей стабильной нефти, направляется в печь П-1, где нагревается до температуры 180-230 °С. Затем 20-30% нефти поступает на 2-ю тарелку и куб стабилизационной колонны К-1. Основная часть нефти после печи П-1 поступает в емкость Е-1, где путем однократного испарения при давлении 5-8 кгс/см² происходит разделение на паровую и жидкую фазы. Пары легких углеводородов и водяные пары из емкости Е-1 поступают на 10-ую тарелку колонны К-1, а жидкая фаза из емкости Е-1 подается на 7-ую тарелку колонны К-2.

Сверху стабилизационной колонны К-1 выводится в паровой фазе ШФЛУ и часть водяных паров, которые, пройдя концевые холодильники КХ-1, конденсируются и поступают в рефлюксную емкость С-1. ШФЛУ из емкости С-1 подается на орошение колонны К-1, а избыточное количество откачивается в бензопарк.

Нефть из колонны К-1 поступает по перетоку на 2-ю тарелку колонны К-2. Сверху колонны К-2 выводятся керосиновая фракция и водяные пары, которые, пройдя концевые холодильники КХ-2, конденсируются и поступают в рефлюксную емкость С-2. Из С-2

керосиновая фракция (РПН) подается на питание в колонну К-1 на 15 и 21 тарелки, а при необходимости в технологические емкости.

С низа колонны К-2 стабильная нефть прокачивается через теплообменники Т-2 (на схеме не указано), Т-1, в которых охлаждается до температуры 30-40°C и направляется в резервуары товарного парка [2].

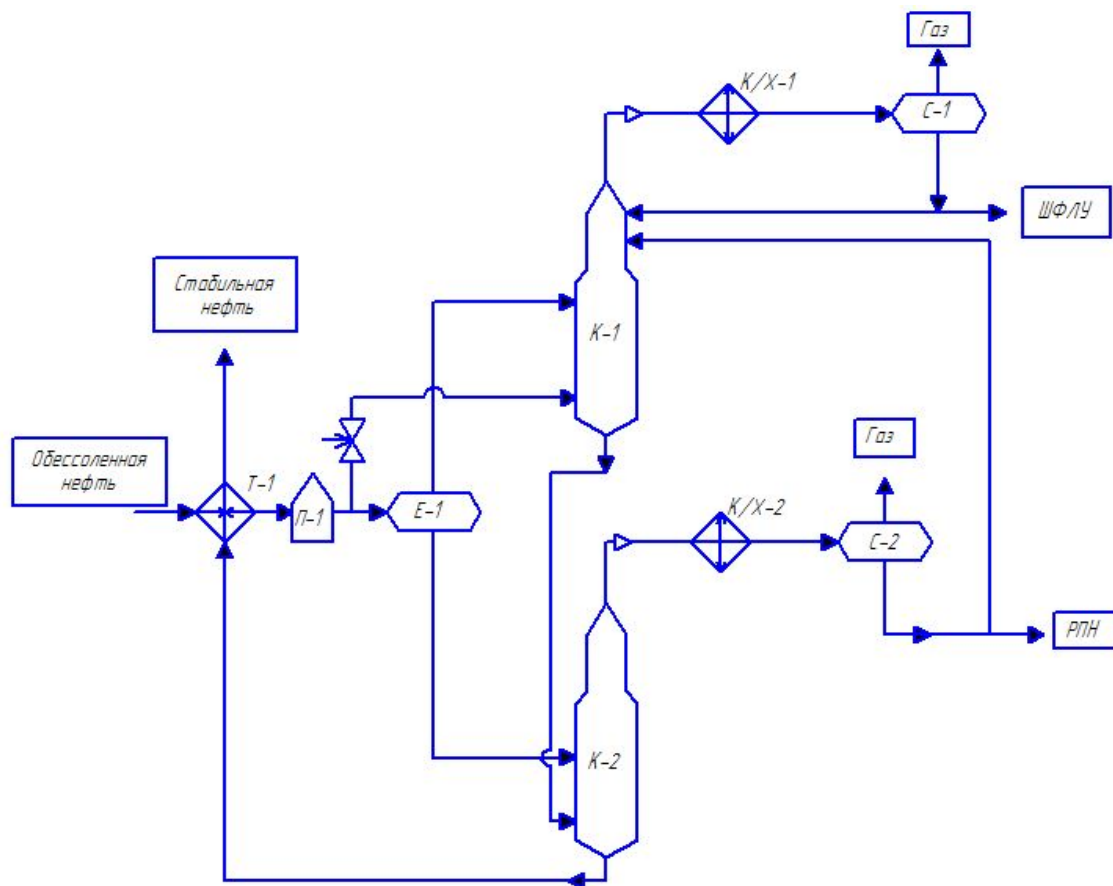


Рис. 1. Схема стабилизации нефти ректификацией в двух колоннах

В результате сравнительного анализа получен вывод, что конструктивное объединение колонн К-1 и К-2 в одну сложную ректификационную колонну снизит затраты по некоторым пунктам и повысит эффективность производства. Применение сложных ректификационных колонн позволяет значительно уменьшить не только эксплуатационные, но и капитальные затраты за счёт улучшения термодинамических условий разделения, рациональной организации теплообмена, совмещения в одном аппарате нескольких технологических процессов и т.д. [3].

В случае объединения колонн из предыдущей схемы стабилизации исключается емкость Е-1, в которой происходило однократное испарение нефти и которая служила отгонной частью колонны К-1.

Нефть, подогретая в теплообменниках Т-1, поступает на питание в колонну, сверху которой будет отбираться ШФЛУ, снизу – стабильная нефть, а керосиновая фракция в виде бокового погона. Кубовая часть колонны будет подогреваться трубчатой печью П-1 («горячая струя»).

В системе двух колонн присутствует довольно развитая система трубопроводов – перетоки нефти, продуктов с емкости Е-1 в колонны, с К-1 на К-2 и т.д., обусловленные конструкцией узла стабилизации. А это, в свою очередь, влечет за собой тепловые потери процесса, требует больших усилий в обслуживании: трубы со временем забиваются,

возникает необходимость их чистки или замены; увеличивается число фланцевых соединений, которые требуют периодических замен прокладок.

При слиянии двух колонн в одну, все эти недостатки существенно уменьшатся. Длина и количество трубопроводов сократятся; процессы получения ШФЛУ, РПН и стабильной нефти будут проходить в одной колонне, что позволит снизить потери тепла, более эффективно использовать энергию системы.

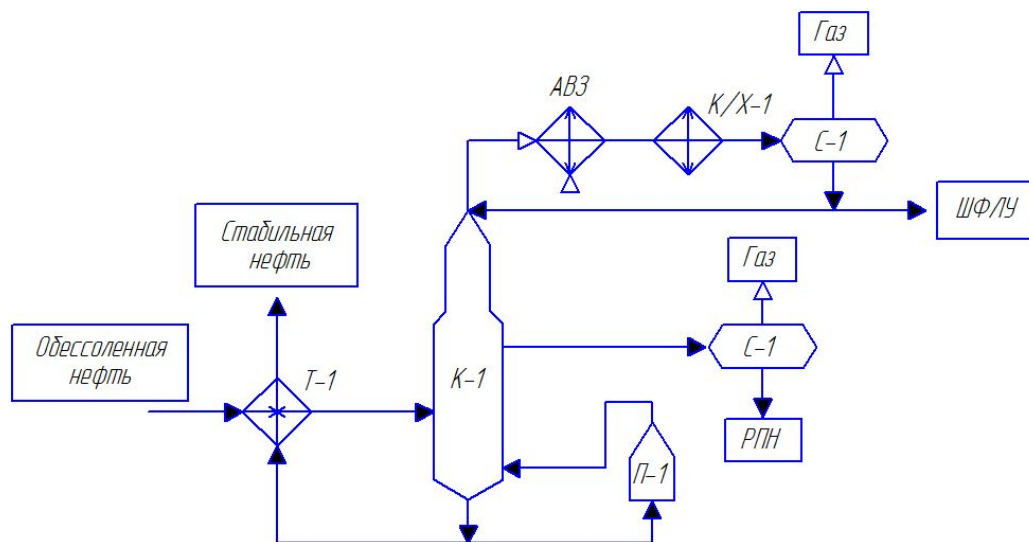


Рис. 2. Схема стабилизации нефти с «горячей струей»

Можно также выделить преимущества сложной колонны с точки зрения конструкции: в аппарате необходимо предусмотреть только два сварных днища, в то время как у системы из двух простых колонн их четыре. Это в свою очередь снижает металлоемкость конструкции. Необходимость в емкости однократного испарения Е-1 отпадает, нефть напрямую поступает в отгонную секцию колонны, что придает некоторую компактность узла стабилизации.

Все вышеперечисленные факторы позволяют снизить капитальные и эксплуатационные затраты производства стабильной нефти.

Литература

- [1] Рахимов А.Р., Лукин В.О., Матюшко Б.Н. Анализ схем стабилизации нефти. Материалы второй всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология». К: КГТУ. 2008. 647с.
- [2] Технологический регламент установки комплексной подготовки нефти Азнакаевского цеха по комплексной подготовке и перекачке нефти. Утвержден 16.05.2009, дата окончания действия регламента 16.05.2014. 27с.
- [3] Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. М.: «Химия». 1978. 280с.

РАЗРАБОТКА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПАКЕТНОЙ ВИХРЕВОЙ НАСАДКОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭТИЛОВОГО СПИРТА

Неробелов А.О., Полянский А.В., Ворошин А.В.

Ивановский государственный химико-технологический университет.

E-mail: voroshin@gtl-rus.com

На кафедре «МАХП» ИГХТУ проводились исследования выявления влияния конструктивного оформления разных типов насадок (пакетная вихревая насадка, псевдоожиженная шаровая, неупорядоченные кольца Рашига) на интенсивность тепло- и массообменных процессов.

Пакетная вихревая насадка разработана на кафедре «МАХП» в Ивановском государственном химико-технологическом университете и запатентована [1, 2]. Исследования проводились с применением новой вихревой пакетной насадкой, схематичный вид которой представлен на рис. 1.

Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных аппаратов состоит из множества одинаковых ячеек прямоугольной формы, соединенных между собой в единый пакет, стенки каждой ячейки смещены относительно друг друга по вертикали, перекрывая фронтальную щель на входе в ячейку за счет удлиненных, загнутых внутрь окончаний, образующих завихритель. На выходе из ячейки, окончания обеих стенок также выполнены удлиненными и загнутыми внутрь, перекрывая фронтальную щель и образуя второй завихритель. Поверхность каждой ячейки полностью или частично покрыта регулярной шероховатостью или перфорацией любой формы.

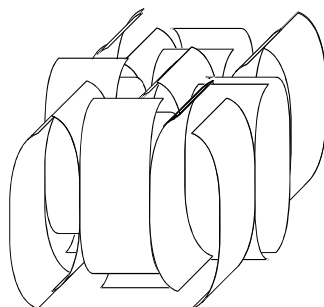


Рис. 1. Схема пакетной вихревой модифицированной насадки
(один из вариантов исполнения)

Как показали лабораторные исследования процессы абсорбции диэтаноломином CO_2 испытываемая насадка может устойчиво работать вплоть до скорости газа $U_r=6$ м/с. В диапазоне скоростей газа или пара от 2,5 до 5,5 м/с наблюдается устойчивый эмульсионный режим взаимодействия фаз, при котором развивается исключительно высокая поверхность массообмена и большие коэффициенты массопередачи. Рост гидравлического сопротивления слоя пакетной вихревой насадки при скорости газа свыше 4,5 м/с незначителен. Так, например, при $U_r=4,5$ м/с гидравлическое сопротивление составляет 430 Па/м, а при $U_r=6$ м/с – 480 Па/м при плотности орошения $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при больших плотностях орошения пакетная вихревая насадка обладает значительно более низким гидравлическим сопротивлением по сравнению с другими исследуемыми насадками при равных расходах жидкой и газовой фаз, и в тоже время нормальный режим обладает в несколько раз более высокими объемными коэффициентами массопередач.

Необходимо отметить, что исследуемая нами вихревая пакетная насадка устойчиво работает в широком диапазоне изменения плотностей орошения от 20 до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$, что выгодно ее отличает от других конструкций насадок.

Пакетные вихревые насадки применяются для тепло- и массообменных процессов (абсорбция, ректификация, очистка газов). Анализ существующих массообменных устройств показывает, что при разработке новых конструкций стремятся увеличить линейные скорости течения парогазовых потоков, что, в свою очередь, увеличивает коэффициент массопередачи в системе газ-жидкость и уменьшает диаметр аппаратов. В последнее время наметились тенденции по развитию пакетных насадок, характеризующиеся развитой межфазной поверхностью контактирования фаз при пленочном течении жидкой фазы, более высокой скоростью движения газообразной фазы и более устойчивым противоточным режимом работы, по сравнению с другими видами насадок (например, лучшие насадки фирмы «Зульцер»).

Пакетная вихревая модифицированная насадка отличается высокой долей свободного сечения, за счет использования тонкостенных образующих элементов и особым регулярным расположением вихревых ячеек. В связи с тем, что ячейки идентичны по размерам и форме, а также расположены симметрично, происходит равномерное распределение между соседними элементами насадки, как объемного расхода газа, так и объемного расхода орошающей жидкости. Такое конструктивное решение позволяет проводить массообменный процесс на более высоких скоростях движения газового потока, в условиях противоточного режима движения взаимодействующих фаз, не в пленочном режиме, а в режиме устойчивой эмульсии по сравнению с другими видами насадок.

Слои могут располагаться, непосредственно соприкасаясь друг с другом (плотный пакет), или распределяться на некотором расстоянии друг от друга (раздвинутый пакет). Раздвинутый пакетный слой имеет ряд преимуществ. Благодаря такому решению при большом скоплении газа повышается количество зависающей жидкости внутри многослойной насадки. Увеличение подвеса объема жидкости наблюдается в пространстве между пакетами, а интенсивное дробление жидкости проходящим газовым потоком создает развитую брызго-капельную область, что способствует более развитой межфазной поверхности.

Кроме этого, в межпакетном пространстве происходит перераспределение орошающей жидкости по сечению аппарата, что способствует более равномерному орошению насадки.

За счет высокой интенсивности можно уменьшить флегмовое число и, соответственно, снизить расходы электроэнергии, затрачиваемой на процесс ректификации.

Литература

- [1] Кадыров Р.Ф., Блиничев В.Н., Чагин О.В. Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных колонных аппаратов. Packet-type vertical packing for heat and mass exchange column-type apparatuses *Международный патент* PCT/RU2010/000077. WO 2011/102749 A1 25.08.2011.
- [2] Кадыров Р.Ф., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кадыров Р.Р. Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных колонных аппаратов, *патент RU* № 246461. 20.04.2011.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ КАТАЛИТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ГЕТЕРОФАЗНОГО КАТАЛИЗА

Шулаева Е.А., Резяпов Р.В.

Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета
в г.Стерлитамаке. E-mail: eshulaeva@mail.ru

Применение сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных волн в качестве теплоносителя для нагрева сред различной природы является одним из способов повышения эффективности современного химического производства, стимулирующим исследования применения СВЧ электромагнитных волн в химической технологии. В настоящее время в России, США, Великобритании, Канаде, Франции, Бельгии, Нидерландах, Японии и других странах мира существуют химические лаборатории, ориентированные на исследования в этой области химии и на создание специальных СВЧ установок для проведения конкретных химических процессов.

При расчете технологических параметров электродинамического реактора, по сравнению с традиционным – каталитическим необходимо учитывать характеристики электромагнитного поля и электрофизические свойства вещества катализатора. Данные параметры непосредственно связаны с определением характерных размеров реакционной установки, т.е. ее диаметра и высоты [3].

Другой характеристикой, определяемой параметрами электромагнитного поля и влияющей на конструктивные особенности реактора, в частности, минимального диаметра реакционного устройства, является длина волны электромагнитного излучения. При исполь-

зовании СВЧ излучения корпус реакционного устройства является резонатором. Основным условием распространения электромагнитных волн в резонаторе является соотношение:

$$\lambda < \lambda_{кр}, \quad (1)$$

где λ – длина волны электромагнитного излучения, м; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны – это длина волны, больше которой распространение электромагнитных волн в волноводе невозможно, м.

Критическая длина волны для волн типа E_{mn} определяется следующим соотношением:

$$\lambda_{кр E} = \frac{2\pi a}{P_{mn}}, \quad (2)$$

где a – радиус волновода, м; P_{mn} – корни функции Бесселя J_m порядка m [4].

Таким образом, можно определить радиус реакционной установки:

$$a > \frac{\lambda P_{mn}}{2\pi}. \quad (3)$$

Аналогично можно определить критическую длину волны для волн типа H_{mn} :

$$\lambda_{кр H} = \frac{2\pi a}{P'_{mn}}, \quad (4)$$

где P'_{mn} – корни функции Бесселя J'_m [4].

Таким образом, минимальный диаметр реакционного устройства, в котором могут без потерь распространяться электромагнитные волны типа E_{01} и H_{11} при длине волны 0,12 м, соответствующей частоте 2450 Гц, равен 0,092 м.

Исходя из требуемой производительности реактора, определяется объем катализатора, учитывая ограничения, изложенные выше. Таким образом:

$$V_K = \frac{V_G}{W}, \quad (5)$$

где V_K – объем катализатора, м³; V_G – объемная скорость газа, м³/ч; W – объемная скорость подачи, ч⁻¹.

Для оценки энергетической эффективности каталитического процесса под действием СВЧ ЭМИ тепловой баланс лабораторной установки рассчитывается по формуле:

$$Q_m + Q_{вх} = Q_p + Q_{исх} + Q_{ном}, \quad (6)$$

где Q_m – теплота выделяемая при поглощении электромагнитного излучения, Дж/час; $Q_{вх}$ – теплота вводимая в реакционную установку потоком газовой смеси, Дж/час, определяемая как $Q_{вх} = G \cdot c \cdot T_{вх}$, где G – количество вещества поступающего в реактор, моль/час, c – молярная теплоемкость, Дж/(моль · К), $T_{вх}$ – температура газовой смеси на входе в реактор, К; Q_p – теплота поглощаемая/выделяемая в ходе химических реакций, Дж/час; $Q_{исх}$ – теплота уносимая из реакционной установки, Дж/час; $Q_{ном}$ – тепловые потери в реакционной установке, Дж/час, как правило, для целей технологического расчета принимается в 5%, от теплоты, поступающей в реакционную установку.

Таким образом, тепловой КПД реакционной установки:

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_m}. \quad (7)$$

Мощность магнетрона, необходимую для проведения химических превращений можно рассчитать исходя из уравнения теплового баланса реакционной установки (6):

$$Q_m = Q_p + Q_{исх} - Q_{вх} + Q_{ном}.$$

Таким образом, выражения (1-7) позволяют произвести технологический расчет реакционного устройства. К особенностям данного расчета можно отнести необходимость определения «полных» глубин поглощения СВЧ ЭМИ для катализаторов, используемых в каждом конкретном технологическом процессе на основе экспериментальных данных. Другой особенностью является необходимость выбора диаметра реакционного устройства, исходя из длины волны ЭМИ СВЧ генератора.

Конструкция реактора для проведения процессов под воздействием микроволнового излучения. На основании лабораторных исследований было разработано специальное реакционное устройство для осуществления эндотермических процессов с использованием микроволнового нагрева [1]. Принципиальная схема реакционного устройства (СВЧ реактора) приведена на рис. 1. Реактор имеет внутренний диаметр – 100 мм, максимальную высоту – 1340 мм, толщину стенки – 5 мм. Установка включает источник микроволнового излучения непрерывного действия с фиксированной частотой колебаний 2450 МГц и регулируемой выходной мощностью 0-5 кВт.

Реактор (резонатор для генератора микроволн) представляет собой вертикальный цилиндрический теплоизолированный сосуд и состоит из трех основных узлов (рис. 2): ввода сырья и микроволнового излучения, реакционной зоны и узла вывода продуктов реакции.

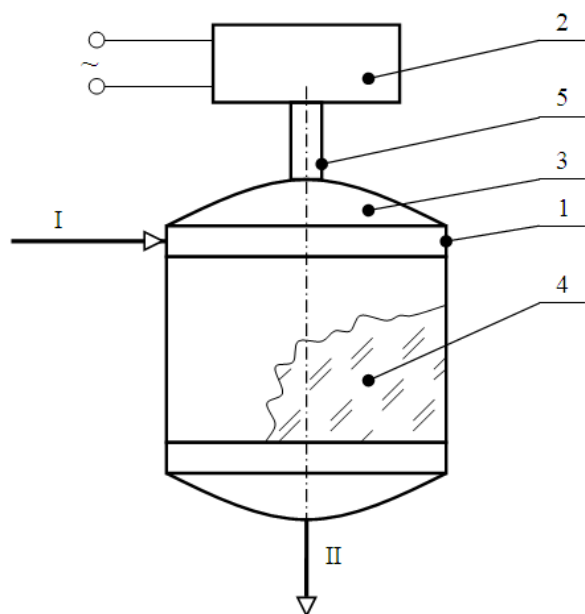


Рис. 1. Принципиальная схема СВЧ каталитического реактора для эндотермических гетерофазных реакций:
1 – корпус реактора; 2 – генератор СВЧ-излучения; 3 – верхняя крышка реактора; 4 – катализатор; 5 – волновод; I – сырье – бутены; II – контактный газ.

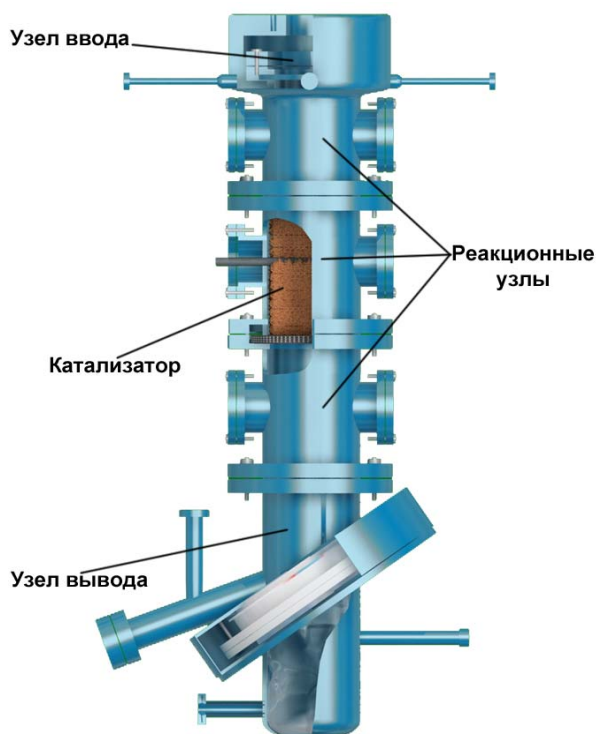


Рис. 2. Модель электродинамического реактора в разрезе

Верхняя крышка реактора играет роль излучающей антенны, обеспечивающей равномерное распределение энергии по поперечному сечению реактора. В качестве материала для изготовления реактора предлагается легированная сталь 8Х18Н10Т, устойчивая к действию агрессивных сред в широком интервале температур и обладающая достаточной электропроводностью. Последнее условие необходимо для предотвращения потерь электромагнитной энергии.

В узле ввода устанавливается фторопластовая мембрана, которая обеспечивает герметичность реакционной зоны. Сырье в реакционную камеру вводится тангенциально, выходящий газ отводится снизу. В реакционной камере установлены распределительные решетки для катализатора, изготовленные из проницаемой для микроволн жаропрочной керамики.

В узле вывода продуктов реакции находится согласующая камера для поглощения остаточного излучения. Остаточное излучение из-за неполного поглощения его веществом катализатора проникает через мембрану согласующей камеры и поглощается водой. Наклонная поверхность согласующей камеры ослабляет прямое отражение микроволнового

излучения в магнетрон. В согласующей камере собираются измельченные частицы катализатора.

Согласующая камера снабжена люком, посредством штуцеров можно регулировать уровень наполнения камеры жидкостью. На крышке люка вмонтированы приборы контроля и измерения.

К преимуществам реактора относятся возможность работы в широком температурном диапазоне и стойкость к воздействию агрессивных сред. В качестве конструкционного материала реактора выбрана легированная сталь, хорошо зарекомендовавшая себя в нефтехимической промышленности для изготовления различных аппаратов и оборудования.

Благодаря блочной конструкции реакционной зоны возможно изменять размеры реактора, сохраняя нужное соотношение высоты к диаметру. Данное соотношение может варьироваться от минимальных значений до величины 9,75.

Реактор принципиально отличается от эксплуатируемых в настоящее время в промышленности реакторов способом подвода энергии в реакционную зону, что значительно снижает энергозатраты, упрощает управление технологическим процессом и повышает КПД установки. Немаловажное значение имеет также преимущество разработанного реактора в экологическом аспекте. При его эксплуатации отсутствуют выбросы газов в атмосферу, которые образуются в большом количестве при сжигании топлива в пароперегревательных печах, сокращается потребление воды, которая используется только в замкнутом цикле для охлаждения магнетрона, циркулятора и в качестве согласующей нагрузки. Общий КПД микроволновой установки в 1,2 раза выше, чем у существующих промышленных установок [2].

Литература

- [1] Бикбулатов И.Х., Даминев Р.Р., Шулаев Н.С., Шулаев С.Н. Патент на изобретение No.2116826 Сверхвысокочастотный каталитический реактор для эндотермических гетерофазных реакций. *БИ.* **1998.** №22.
- [2] Бикбулатов И.Х., Даминев Р.Р., Шулаев Н.С., Шулаева Е.А., Феоктистов Л.Р. Моделирование процесса дегидрирования бутенов в электродинамическом каталитическом реакторе. Бутлеровские сообщения. **2011.** Т.24. №1. С.99-104. URL: <http://butlerov.com/bh-2011/>
- [3] Шулаева Е.А. Моделирование процессов дегидрирования бутенов и гидрирования пиперилена в электродинамических каталитических реакторах. Канд. дисс. *Уфа: УГНТУ.* **2012.** 133с.
- [4] Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы). *М.* **1968.** 344с.

ВАКУУМНОЕ ДЕГИДРИРОВАНИЕ

Назаров А.А.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp_kstu@mail.ru

Дегидрированием углеводородов называют реакцию отщепления водорода от соединений в присутствии катализаторов. Процесс каталитического дегидрирования – обратимый процесс. Протеканию реакции дегидрирования способствует повышение температуры и понижение давления. Как правило, процесс осуществляют в диапазоне температур 300-700 °С во избежание заметного пиролиза исходного сырья и продуктов реакции.

Реакции дегидрирования углеводородного сырья подчиняются принципу Ле-Шателье. Поскольку, в реакции дегидрирования при переходе от исходных веществ к продуктам реакции, объем продуктов реакции превышает вдвое объем исходного сырья, то понижение давления в реакционной зоне должно способствовать увеличению доли выхода целевых продуктов и снижение затрат на единицу выпускаемой продукции. Исследования в данном направлении практически не проводились в мировой практике, поэтому, безусловно, актуальным является дальнейшее исследования процесса вакуумного дегидрирования углеводородов и внедрение в производственные технологии.

Процесс дегидрирования углеводородного сырья под вакуумом способен значительно увеличить выход продуктов реакции, а также снизить затраты на подогрев исходного сырья и водяного пара, что значительно позволит снизить экономические затраты в следующих технологических процессах:

1. Получение стирола дегидрированием этилбензола.

Большую часть стирола в промышленности получают дегидрированием этилбензола при температуре 600-650 °С, атмосферном давлении и разбавлении перегретым водяным паром в пропорции 1 к 3-10.

2. Синтез изопрена из изобутилена и формальдегида.

Промышленный процесс получения изопрена по данному способу проводится в 2 стадии: Первая стадия – конденсация изобутилена с формальдегидом с образованием диметилдиоксана (ДМД); вторая стадия – каталитическое разложение ДМД с образованием изопрена (собственно дегидрирование). Вторая стадия проводится в условиях разбавления ДМД водяным паром при соотношении (объемном или мольном) водяной пар / ДМД равно 7 и выше. Для оптимальных условий проведения процесса соотношение составляет 10,55 (в массовых долях).

3. Получение изопрена дегидрированием изопентана и изоамиленов.

Данный процесс дегидрирования – каталитический процесс, поэтому оптимальная степень разбавления реакционной смеси водяным паром существенно зависит от выбора катализатора. Мольное соотношение расхода водяной пар / реакционная смесь может иметь значение от 7 до 20. При этом эффективность катализатора определяется не только расходом водяного пара, но и рядом факторов (температура процесса, степень конверсии, селективность катализатора, затраты на регенерацию и т.д.).

4. Получение бутадиена дегидрированием бутанов и бутиленов.

Данный процесс целесообразно проводить при температурах выше 820 °С и парциальном давлении реакционной смеси не более 10 кПа, что соответствует разбавлению смеси паром не менее чем 1:10 (в мольном соотношении). Массовое соотношение водяной пар/ бутилен будет составлять при этом не менее чем 3 к 1. Учитывая термическую нестабильность целевых углеводородов и протекание побочных реакций при высоких температурах, на практике расход пара поддерживают на более высоком уровне 1 к 20.

Наиболее актуальными и перспективными задачами исследований процесса вакуумного дегидрирования, которые позволят увеличить выход целевых продуктов и снизить затраты на единицу выпускаемой продукции являются:

- Изучение влияния пониженного давления на конверсию и селективность реакции дегидрирования;
- Анализ влияния химического состава катализатора и времени контакта с ним на конверсию и селективность реакции дегидрирования;
- Анализ равновесного состава контактного газа после реакции, для оценки преимущества вакуумного одностадийного дегидрирования над двухстадийным дегидрированием при повышенном или атмосферном давлении;
- Применения процесса одностадийного вакуумного дегидрирования в существующих производственных технологических цепочках позволит:
- Значительно сократить расходы водяного пара в процессе дегидрирования;
- Осуществлять регенерацию катализатора воздухом;
- Исключить из технологической цепочки сложное теплообменное оборудование;
- Исключить необходимость проведения второй стадии дегидрирования, как, например, в случае дегидрирования бутан-бутиленовой фракции.

Применение указанного процесса в производстве позволит значительно увеличить рентабельность процессов дегидрирования углеводородов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ В МИЛЛИРЕАКТОРЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОДИЗЕЛЯ

Лунина А.С., Абиев Р.Ш., Дымов А.В.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). E-mail: rufat.abiev@gmail.com

Сегодня отчетливо выражена мировая тенденция по поиску новых экологически чистых источников энергии. Одним из таких источников является биодизель. Биодизель — это метиловый эфир, получаемый в результате химической реакции из растительных масел и животных жиров. Данный вид энергии имеет ряд неоспоримых преимуществ относительно традиционных энергоносителей, получаемых из невозобновляемых природных источников. Существующие технологии получения биодизеля имеют ряд недостатков, главное из которых - использование специально выращиваемого растительного сырья (зерновых, масличных культур). Производство биодизеля из растительного сырья может привести к сокращению объема имеющегося продовольствия, используемого на цели питания, так как «эффективный» спрос на зерно (масло) может перекрыть спрос на продукты питания. Этот новый источник спроса играет важную роль, оказывая влияние на рост цен. Вследствие этого для получения биодизеля с требуемыми качественными характеристиками в некоторых случаях рационально использовать рыбий жир (по возможности некондиционный рыбий жир, непригодный для пищевого или другого использования по причине высоких показателей окисления).

На рыболовных (добывающих) и рыбоперерабатывающих судах рыбий жир скапливается в большом количестве. Этот жир возможно использовать в качестве сырья для производства биодизеля непосредственно на самом судне. Применение миллиреакторов делает возможным такое производство благодаря преимуществам, касающимся экономии пространства, энергетических и материальных ресурсов. К достоинствам миллиреактора можно отнести компактность, высокую эффективность, хороший массообмен. Вместе с тем существует проблема, связанная с формированием капель дисперсионной фазы в миллиректорах, а в многоканальных, кроме того, возникает проблема неравномерности распределения фаз по каналам.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процессов формирования капель в производстве биодизеля с разработкой опытного образца многоканального миллиреактора-отстойника.

Для достижения этой цели была разработана экспериментальная установка, состоящая из смесителя 1, представляющем собой стеклянный элемент цилиндрической формы, в котором герметично смонтирована трубка из ПВХ (внутренний диаметр 3 мм) с образованием кольцевой полости между ними. В трубке (внутри смесителя) выполнены отверстия диаметром 1,5 мм в трех вариантах расположения отверстий 2 в трубке: одно отверстие (рис. 1), два отверстия друг напротив друга (рис. 2), два отверстия со сдвигом относительно друг друга (рис. 3). Модельные жидкости – подсолнечное масло и вода – подавались по трубкам из разных емкостей с помощью перистальтических насосов. Масло подавалось в осевой патрубок 3, вода – в боковой патрубок 4. В смесителе происходило формирование капель воды и жидкостных снарядов масла (слагов) преимущественно в снарядном режиме течения. С помощью фотокамеры Canon, оснащённой специализированным макрообъективом, фотографировался участок трубки длиной 80 мм (см. рис. 4, 5) и место образования капель в смесителе (см. рис. 6).

На настоящий момент проведены опыты с одним и двумя отверстиями друг напротив друга. Исследовалось влияние геометрии расположения отверстий и влияние соотношения расходов подаваемых жидкостей на режим течения жидкостной смеси. По фотографиям определялось распределение длин пузырей и слагов в зависимости от вышеуказанных факторов. В результате обработки экспериментальных данных были выявлены диапазоны и соотношения расходов, при которых формируется устойчивый снарядный режим, а также наиболее благоприятный вариант геометрии расположения отверстий.

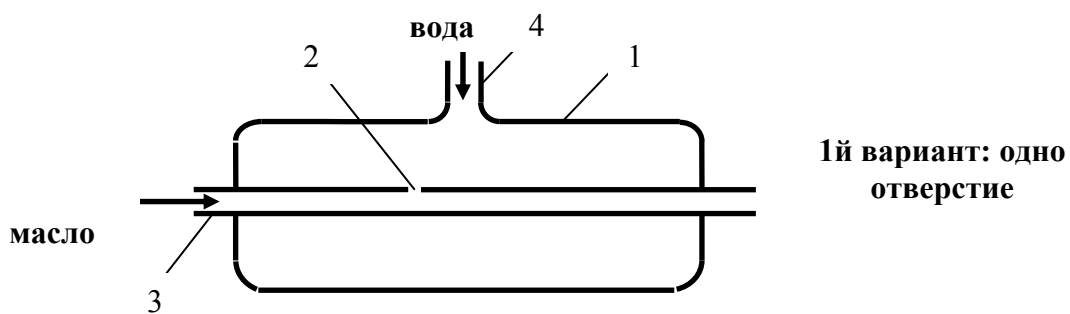


Рис. 1

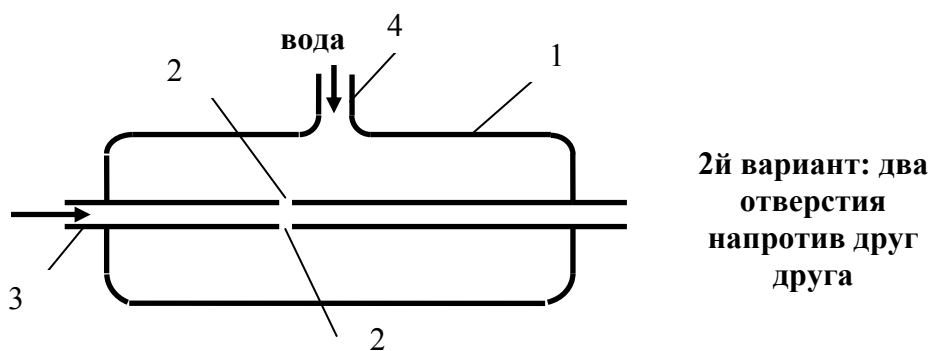


Рис. 2.

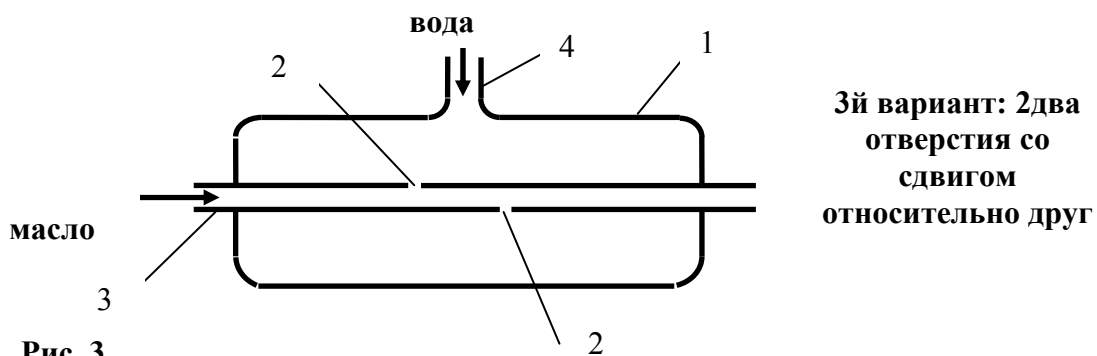


Рис. 3

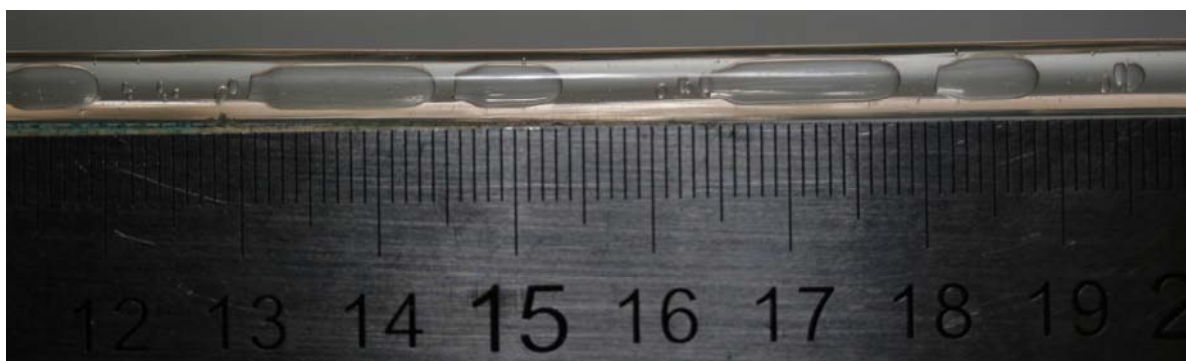


Рис. 4. Снарядный режим (2 отверстия друг напротив друга). Соотношение расходов 1:1 ($Q_M=22,8$ мл/мин, $Q_B=22,8$ мл/мин)



Рис. 5. Снарядный режим (одно отверстие). Соотношение расходов 3:1
($Q_M=24,5$ мл/мин, $Q_B=8,1$ мл/мин)



Рис. 6. Образование капель: одиночное отверстие, соотношение расходов 1:1
($Q_1=10,1$ мл/мин, $Q_2=10,1$ мл/мин)

Спроектирован многоканальный миллиреактор-отстойник, выполненный в виде компактного модуля и отвечающий требованиям ограниченности пространства на судне.

Планируется провести дальнейшие опыты с другой геометрией расположения отверстий в смесителе с целью нахождения оптимального варианта, при котором будет наблюдаться устойчивый снарядный режим течения, а также наилучшие условия массообмена в процессе производства биодизеля.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ФТОРИСТОГО АЛЮМИНИЯ

Размахова Е.С., Гусаров А.А., Ефимов А.В., Постникова И.В.

Ивановский государственный химико-технологический университет. E-mail: www.isuct.ru

Фторид алюминия входит в состав флюсов, эмалей, стекол, глазурей, керамики, покрытий сварочных электродов; является катализатором в органическом синтезе, используется при производстве электролитического алюминия для корректировки состава электролита.

Очевидно, что продукты, полученные по гидрохимическим схемам, отстают от лучших образцов по таким важным показателям как, содержание диоксида кремния, гранулометрический состав, удельный вес, сыпучесть (угол естественного откоса), а также по величине потерь при прокаливании. Если последний показатель регулируется изменением режима работы прокалочных барабанов, то все остальные свойства можно улучшить только путём кардинального обновления технологии.

Другой важной проблемой остаётся экологическая обстановка на алюминиевых заводах является сокращение выбросов в атмосферу вредных соединений, таких как твёрдые и газообразные фториды, смолистые и оксиды серы.

Сокращение выбросов твёрдых и газообразных фторидов- самых экологически опасных соединений- возможно различными путями: это технологические и технические мероприятия непосредственно на электролизере, например изменение криолитового отношения электролита с обязательным снижением температуры электролизера, применение АПГ, «сухой» анодной массы и т.д..

Известны два взаимодополняющих варианта, наиболее радикальных с точки зрения сокращения выбросов фторидов. Первый- это применение более эффективных систем очистки и переработки электролизных газов, чем те, которые пользуются в настоящее время на отечественных алюминиевых заводах. Второй- применение фторида алюминия в гранулированном виде, что повлечёт за собой снижение его расхода и уменьшение количества вредных выбросов фтористых соединений на 25-30%

Гранулирование связано с изменением агрегатного состояния сред. По этому признаку гранулирование можно классифицировать следующим образом: из жидкой фазы; из твердой фазы; из смеси жидкой и твердой фаз; из газообразной фазы; из смеси жидкой и газообразной фаз; из смеси жидкой, твердой и газообразной.

Эффективность процесса гранулирования зависит от механизма гранулообразования, который, в свою очередь, определяется способом гранулирования и его аппаратным оформлением. В связи с этим методы гранулирования целесообразно классифицировать следующим образом: окатывание; диспергирование жидкости в свободный объем или нейтральную среду; диспергирование жидкости на поверхность гранул, находящихся во взвешенном состоянии; прессование сухих порошков; формование или экструзия.

В зависимости от природных свойств гранулируемых материалов, методы можно классифицировать следующим образом: влажное гранулирование; сухое гранулирование; структурное (гранулирование в кипящем слое).

В основе способа гранулирования лежит использование различных физико-механических и физико-химических процессов, в связи с этим гранулирование можно классифицировать: получение укрупнённых дискретных частиц-гранул из мелкодисперсного материала, связыванием исходных частиц различными механизмами сцепления, агрегирующими частицы в гранулу; деление исходного материала, находящегося в жидкой фазе на отдельные капли, с последующим отвердеванием в процессе кристаллизации или сушки; деление струи высоковязких материалов путём продавливания через калиброванные отверстия; деление крупного куска материала на отдельные мелкие части методами дробления, резки, фрезерования пр..

Цель нашей научной работы – изучение возможности гранулирования фтористого алюминия методом окатывания с одновременной механоактивацией порошка в аппарате с высокоскоростными рабочими органами.

Гранулирование методом окатывания проводят в БГ, БГС, шнековых грануляторах, аммонизаторах-грануляторах.

Нами было рассмотрено влияние механоактивации на растворимость фтористого алюминия.

Значительное изменение скорости реакции объясняет теория активации. Согласно этой теории в химическое взаимодействие вступают только активные молекул (частицы), обладающие энергией, достаточной для осуществления данной реакции. Неактивные частицы можно сделать активными, если сообщить им необходимую дополнительную энергию, – этот процесс называется активацией. Одним из способов активации является механоактивация.

Механоактивация – активирование твёрдых веществ их механической обработкой. Измельчение в ударном, ударно-стирающем или истирающем режимах приводит к накоп-

лению структурных дефектов, увеличению кривизны поверхности, фазовым превращениям и даже аморфизации кристаллов, что влияет на их химическую активность. Механоактивация – следствие создания в некоторой области твёрдого тела напряжений с последующей их релаксацией. Механоактивация происходит, когда скорость накопления дефектов превышает скорость их исчезновения. Это реализуется в центробежных, планетарных и струйных мельницах, дезинтеграторах, – т.е. в устройствах, в которых сочетаются высокие частота и сила механического воздействия.

Одним из видов механоактивации является измельчение в ударном, ударно-истирающем или истирающем режимах, что приводит к накоплению структурных дефектов, увеличению кривизны поверхности, фаз, превращениям и даже аморфизации кристаллов, что влияет на их химическую активность. Измельчение происходило на двухступенчатой центробежно-ударной мельнице кафедры МАХП при различных скоростях вращения ротора.

После измельчения порошок проверили на растворимость в воде, для определения использовался метод комплексонометрического титрования.

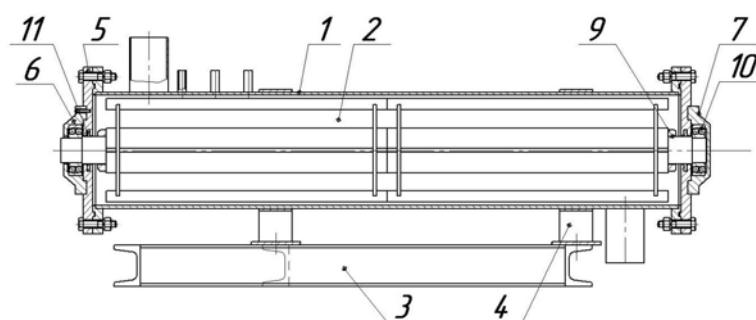


Рис. 1. Принципиальная конструкция скоростного гранулятора. 1 – Корпус; 2 – ротор; 3 – рама; 4 – опора; 5 – фланец; 6 – крышка сквозная; 7 – крышка глухая; 9 – гайка стопорная; 10 – подшипник; 11 – манжета уплотнительная.

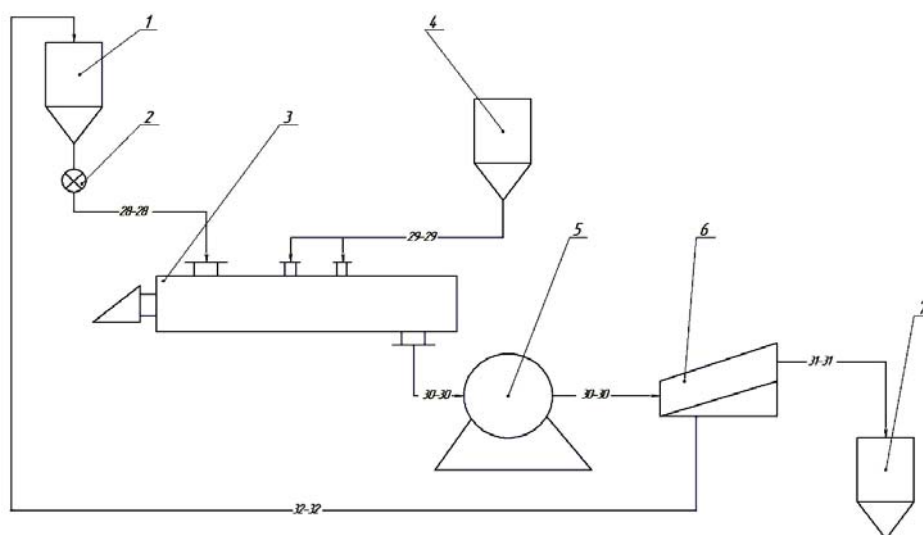


Рис. 2. Экспериментальная схема получения гранулированного фтористого алюминия

По результатам титрования рассчитали концентрацию AlF_3 до и после механо-активации, величины концентраций соответственно $C_1=0,081$ г/(100 мл) для порошка до механоактивации, $C_2=0,084$ г/(100 мл), после механоактивации при 5010 об/мин (самая мелкодисперсная фракция). Так как полученные значения значения близки можно сделать вывод, о том, что размеры частиц порошка на растворимость в воде существенно не влияют.

Поэтому, в дальнейшем необходимо: либо изменить режим обработки сыпучего AlF_3 и его анализа; либо проводить анализ растворимости в другом растворителе; либо в качестве

связующего при гранулировании выбрать другое вещество, растворимость AlF_3 в котором существенно выше, чем в воде.

Предполагается в качестве скоростного гранулятора использовать конструкцию, представленную на рис. 1.

Предполагаемая нами экспериментальная схема получения гранулированного фтористого алюминия представлена на рис. 2.

Описание технологической схемы.

Из бункера поз. 1 через питатель поз. 2 подаётся порошкообразный фтористый алюминий в скоростной гранулятор, туда же поступает связующее из расходной ёмкости поз. 4. Далее влажный гранулированный фтористый алюминий поступает в сушильный шкаф поз. 5. Затем готовый продукт поступает на вибросито поз. 6, где происходит разделение продукта по фракциям: товарная фракция поступает в бункер готового продукта поз. 7, ретур возвращается в бункер исходного материала поз. 1.

Литература

- [1] Богачёв Г.Н., Гузь С.Ю. Производство криолита, фтористого алюминия и фтористого натрия. М., Л., Металлургиздат. 1940. 168с.
- [2] Зайцев В.А., Новиков А.А., Родин В.И. Производство фтористых соединений при переработке фосфатного сырья. М. Химия. 1982. 248с.
- [3] Г.И. Кравченко. Получение фтористого алюминия из кремнефтористоводородной кислоты, являющейся отходом при переработке природных фосфатов: Автореферат дисс. канд. хим. наук. Иваново. 1971. 16с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

Власкина И.И., Бочарова В.А., Назирова Ф.А., Слюняева С.Ю.

Тамбовский государственный технический университет. E-mail: mahp@tambov.ru

Одним из основных компонентов при производстве керамических изделий является инертный наполнитель. Самым распространенным инертным наполнителем в нашей стране является песок. Качество керамической плитки, зачастую, напрямую зависит от качества и гранулометрического состава песка [1]. Однако качеству песка при производстве керамической плитки, к сожалению, уделяют недостаточно внимания. Но, тем не менее, эти вопросы зачастую являются одними из важных.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование процесса измельчения частиц кварцевого песка в измельчителе ударного действия.

Исследование процесса измельчения кварцевого песка проводили на лабораторной установке, созданной на базе установки для смешивания сыпучих материалов «Турбула» [1]. Экспериментальная установка отличается от базовой использованием мелющих тел для процесса измельчения. Вследствие этого основным рабочим органом модернизированной установки является рабочая чаша с мелющими телами — металлическими шарами. Конструкция установки позволяет варьировать скорость вращения рабочей чаши, степень ее заполнения материалом и время процесса измельчения.

В качестве измельчаемого материала использовали просушенный кварцевый песок фракции ХМ. В качестве мелющих тел были применены металлические шары диаметром $d_{\text{ш}} = 8$ мм. Коэффициент заполнения рабочей чаши мелющими телами в процессе измельчения оставался постоянным и равнялся 5%.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем.

В рабочую чашу загружается определенная порция исходного материала. С помощью панели управления задаются режимные параметры измельчителя (частота вращения вала и время измельчения) и затем включается его привод.

С целью исследования кинетики процесса измельчения пробы измельченного материала отбирались через каждые 5 минут. Для этого с помощью пульта управления мельница

выключается и измельчённый материал вместе с мелющими телами извлекается из чаши. Затем с помощью сита материал отделяется от мелющих тел [2].

Далее из массы измельчённого материала отбираются пробы, и производится анализ размеров полученных частиц кварцевого песка с помощью микроскопа металлографической агрегатной серии ЕС МЕТАМ РВ [3]. Общее время измельчения в каждом из опытов составляло 25 минут.

Экспериментальные исследования процесса измельчения кварцевого песка проводились при скорости вращения ведущего вала, равной 36 об/мин. Проведены исследования процесса измельчения в зависимости от коэффициента заполнения рабочей чаши измельчаемым материалом.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1.

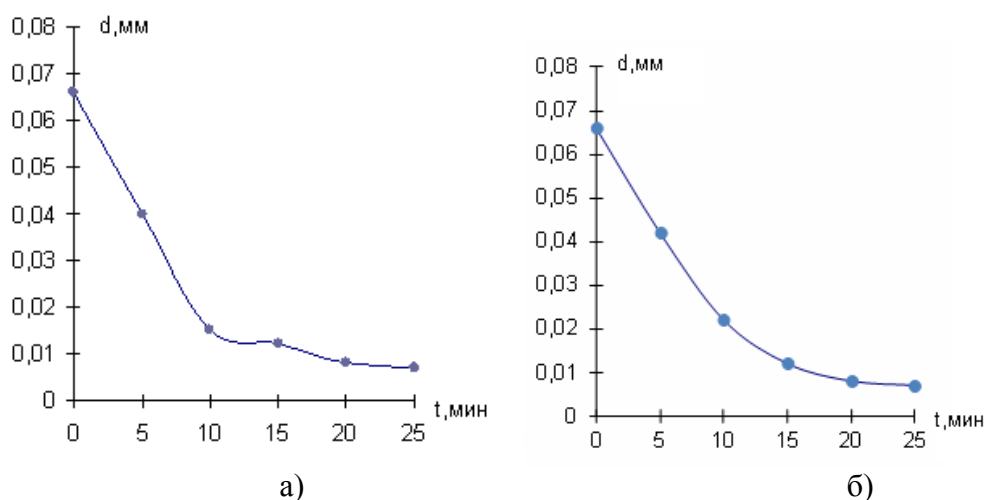


Рис. 1. Кинетика процесса измельчения кварцевого песка:
а) – масса песка 100 г; б) – масса песка 150 г

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что процесс измельчения частиц кварцевого песка наиболее интенсивно протекает в начальный период измельчения. Затем следует период малоинтенсивного помола, что вызвано влиянием на процесс измельчения образующихся мелких частиц. Эти частицы смягчают ударное воздействие металлических шаров на измельчаемый материал.

На процесс измельчения определенное влияние оказывает коэффициент заполнения рабочей чаши кварцевым песком. Из рисунка видно, что измельчение песка при меньшей массе (рис. 1а) протекает интенсивнее, чем при большей его массе (рис. 1б).

Кроме того, процесс измельчения кварцевого песка сопровождается сильным пылением, что может вызвать значительные экологические проблемы в непрерывных производствах. В связи с этим на следующих этапах исследования планируется реализовать мокрое измельчение песка.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности получения микроразмерных частиц кварцевого песка с помощью измельчителя ударного действия.

Литература

- [1] Хинт Й.А. Основы производства силикальцитных изделий. М: Госстройиздат. 1962. 642с.
- [2] Смеситель турбулентный С 2.0: руководство по эксплуатации. Спб. 2010. 17с.
- [3] Микроскоп металлографический агрегатный серии ЕС МЕТАМ РВ: техническое описание и руководство по эксплуатации. Спб. 2003. 25с.

**КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ
5-ФЕНИЛТЕТРАЗОЛА В УСЛОВИЯХ МИКРОРЕАКТОРНОГО СИНТЕЗА**

Сорокин М.А., Попова Е.А., Абиев Р.Ш., Островский В.А.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). E-mail: rufat.abiev@gmail.com

Тетразолы широко используются в различных областях науки и техники. Основными сферами применения соединений данного ряда являются медицина, биохимия, сельское хозяйство, аналитическая химия, системы записи информации, системы защиты металлов от коррозии и энергоемкие материалы. Вместе с тем, арсенал химии гетероциклических соединений пока не располагает достаточно эффективными, селективными и безопасными методами направленного синтеза многих практически значимых тетразолов. В настоящее время ведется активный поиск путей оптимизации процессов получения тетразолсодержащих соединений. Одним из наиболее эффективных и безопасных способов получения 5R-тетразолов может оказаться азидирование нитрилов в условиях микрореакторного синтеза.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса азидирования нитрилов в условиях микрореакторного синтеза.

Для достижения поставленной цели была разработана экспериментальная установка (рис. 1), которая представляет собой трубку 1 из фторопласта (длина 12 м, внутренний диаметр 1 мм), погруженную в термостат 2. Перемещение реакционной массы в канале осуществлялось с помощью перистальтического насоса 3 с расходом 3 мл/мин. Отбор проб производился через Т-образный элемент 4.

Для оценки эффективности данного метода на первом этапе работы было проведено количественное исследование кинетики азидирования бензонитрила в условиях микрореакторного синтеза и сопоставили полученные константы скорости реакции с известными данными, полученными при азидировании в традиционном реакторе.

Кинетику данной реакции изучали в микрореакторе в условиях псевдопервого порядка по субстрату в диметилформамиде в диапазоне температур 85-95°C при атмосферном давлении. Азидирующий агент, диметиламмонийазид, брали в десятикратном избытке по отношению к субстрату. Контроль за ходом реакции осуществляли методом газожидкостной хроматографии по убыли исходного реагента – бензонитрила.

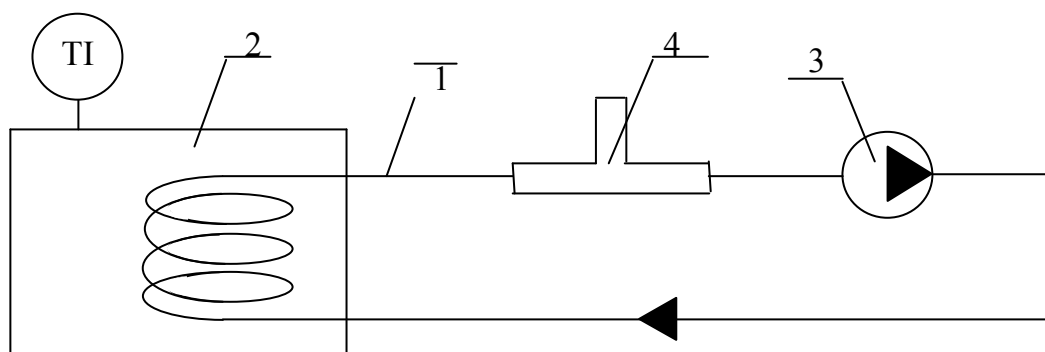


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На настоящий момент проведены опыты при 85, 90 и 95°C. Зависимости концентраций бензонитрила от времени представляют собой типичные кинетические кривые, характерные для реакций первого порядка (рис. 2).

Далее находили константы скорости реакции псевдопервого и второго порядков. В таблице приведены для сравнения значения констант второго порядка для экспериментального микрореактора, а также для классического реактора [1].

Таким образом, эксперименты показали, что при переходе от классического реактора периодического действия к микрореактору скорость реакции существенно не меняется.

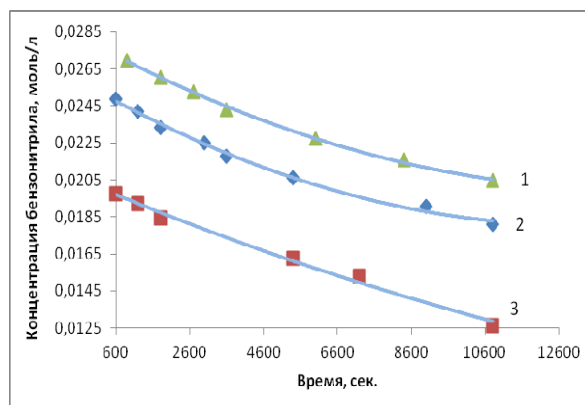


Рис. 2. Зависимость концентрации бензонитрила от времени при температурах, °C: 1 – 85, 2 – 90, 3 – 95.

Таблица. Константы скорости азидирования бензонитрила второго порядка k_{II} в условиях микрореакторного синтеза и классического реактора

Температура, °C	$k_{II} \cdot 10^5$, л/(моль·с)	
	Микрореактор	Классический реактор
70		3.24
80		8.32
85	9.69	
90	11.9	14.9
95	16.6	
100		35.2

Планируется провести дальнейшие опыты при повышенном давлении, как и в работе [2], а также перейти от гомогенной системы к гетерогенной.

Литература

- [1] Попова Е.А., Павлюкова Ю.Н., Попов Е.В., Островский В.А., Трифонов Р.Е. Кинетика азидирования изомерных дицианобензолов. *ЖОрХ*. **2009**. Т.45. Вып.6. С.902-906.
- [2] Palde P.B., Timothy F. Jamison T.F. Safe and Efficient Tetrazole Synthesis in a Continuous-Flow Microreactor. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**. No.50. P.3525-3528.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК МЕТОД ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

Абиев Р.Ш.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). E-mail: rufat.abiev@gmail.com

В связи с усилением энергетической и сырьевой проблемы в последние годы во всем мире усилился интерес к снижению затрат энергетических и материальных ресурсов при сопутствующем повышении полезных эффектов, в том числе в химической промышленности [1].

Методы улучшения характеристик химико-технологического оборудования можно разделить на два больших класса: 1) оптимизация существующих аппаратов, установок и целых производств на основе формальных *математических* методов (от мезо- до мегауровня

[1]); 2) поиск наиболее эффективных для данного процесса *физических* воздействий, включая адаптацию геометрической формы аппаратов и их элементов (микро- и мезоуровни, в некоторых случаях – воздействие на наноуровне).

Среди всего многообразия форм физических воздействий на гетерогенные среды более или менее исследованными и внедренными в промышленную практику являются: мощные сдвиговые течения (струи, мешалки, роторные аппараты), центробежное поле, ультразвуковые волны, электромагнитные волны (в том числе СВЧ), пульсации давления, скорости.

Среди них наиболее прогрессивными были, на наш взгляд, с одной стороны, разработка школой С.М. Карпачевой пульсационных аппаратов для довольно широкого круга процессов [2], с другой – исследования в области применения ультразвуковых (УЗВ) колебаний в металлургических и химико-технологических процессах [3-5]. Кроме того, параллельно были разработаны вибрационные аппараты, которые можно разделить на две большие группы: 1) с неподвижным корпусом и вибрирующим рабочим органом [6]; 2) с качающимся или вибрирующим корпусом [7, 8]. Наиболее рационально и последовательно, с точки зрения эффективности преобразования энергии, идея использования колебательного движения жидкости в технологических процессах реализована в исследованиях и разработках, выполненных в Институте технической теплофизики (ИТТФ) НАН Украины под руководством А.А. Долинского [9, 10].

К сожалению, процесс внедрения в отечественную промышленность перспективных видов оборудования тормозится, что связано, с одной стороны, с недостаточной их изученностью, с другой, – с нежеланием руководителей промышленных предприятий заменять морально и физически устаревшее оборудование.

Одним из перспективных типов оборудования являются пульсационные аппараты нового поколения. В данной работе речь пойдет об аппаратах для гетерогенных систем с жидкой сплошной средой.

Общие принципы интенсификации тепло-массообменных процессов в пульсационных аппаратах нового поколения

С середины 1980 г.г. на кафедре оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры СПбГТИ (ТУ) ведется разработка пульсационных аппаратов (ПА) нового поколения. В результате теоретических и экспериментальных исследований, проектно-конструкторских работ и промышленных испытаний выработаны основные принципы синтеза пульсационных аппаратов.

Первый принцип предложен проф. СПбГТИ (ТУ) Г.М. Островским и заключается в возбуждении колебаний в аппарате с частотой, близкой к собственной частоте системы, т. е. происходит *генерирование резонансных колебаний* [11, 12]. Это способствует тому, что энергия, вводимая в аппарат, расходуется с наибольшей эффективностью, что приводит к снижению энергозатрат, приведенных к единице получаемого продукта.

Второй принцип синтеза ПА нового поколения: для рационального использования энергии целесообразно, чтобы временные и пространственные масштабы воздействия на систему "аппарат – гетерогенная среда" были согласованы с геометрическими, физическими и физико-химическими свойствами элементов этой системы на следующих уровнях:

- Мезоуровень (аппарат и его элементы; слой частиц в аппарате) – создание резонансных колебаний в системе [13], организация необходимого уровня циркуляции в целом по аппарату (при периодическом режиме), либо выравнивание полей температуры и концентрации по поперечному сечению аппарата (в аппаратах вытеснительного типа).
- Микроуровень (частицы, капли, пузыри). В случае обработки деформируемых частиц (капель или пузырей) целесообразно, чтобы подведенная к их поверхности энергия приводила к достаточному внутреннему перемешиванию, к дроблению крупных капель и пузырей, в том числе за счет их резонансных колебаний [14, 15]. При обработке твердых частиц временной масштаб должен быть согласован с временем релаксации твердой

частицы при ее разгоне/торможении, а подводимой энергии должно быть достаточно для интенсивного подвода/отвода вещества к/от поверхности частицы.

- Субмикроуровень (поры и микроканалы в частицах). Продолжительность и интенсивность воздействия должны быть согласованы с длиной микроканалов, пористой структурой материала и свойствами жидкости [16-18].

Вообще говоря, вероятно, возможна организация воздействия и на наноразмерном уровне (молекулы и надмолекулярные образования), что подразумевает соответствующий пространственно-временной масштаб, т. е. сверхвысокие частоты (электромагнитные микроволны в СВЧ-печах, ультразвуковая обработка на сверхвысоких частотах), экстремальные сдвиговые напряжения (например, в коллоидных мельницах или роторно-пульсационных аппаратах [19]).

Третий принцип синтеза ПА нового поколения: преобразование энергии, вводимой в аппарат от источника энергии (привода, генератора пульсаций), должно осуществляться предельно близко к той зоне, где она должна быть использована, т. е. там, где должна быть выполнена полезная работа.

Из второго закона термодинамики следует, что наиболее экономичным будет такой способ трансформации энергии в аппарате с гетерогенной средой, который приводит к наименьшему возрастанию энтропии, а значит, и температуры, т. е. когда затрачиваемая работа минимальна при заданном полезном эффекте. Применительно к обработке гетерогенных сред, где процессы переноса происходят через межфазную поверхность, механическая (а в некоторых случаях, например, в аппаратах адиабатного вскипания [9, 10], – и внутренняя) энергия в идеальном случае должны трансформироваться именно вблизи поверхности контакта фаз.

В аппаратах, где поверхность контакта фаз формируется на поверхности твердых стенок (например: теплообменники, выпарные, пленочные, насадочные аппараты), преобразование энергии должно происходить вблизи поверхности этих стенок. Примером реализации такого аппарата является пленочный аппарат с пьезоэлектрическим возбуждением колебаний стекающей пленки [20].

Другими словами, в идеальном случае нужно обеспечить доставку энергии к межфазной поверхности, теряя минимальное количество энергии в сплошной среде вдали от поверхности частиц. Эта энергия нужна для организации умеренного перемешивания по объему аппарата в целом либо по одной из его ступеней.

Четвертый принцип – равномерность распределения внешних воздействий по частицам дисперсной среды и, как следствие, равномерность распределения выходных параметров – температуры, концентрации веществ.

Здесь имеется в виду равномерное распределение не по всему объему аппарата (что являлось бы нарушением третьего принципа), а более или менее равномерный подвод внешних воздействий ко всем частицам, равная доступность (в среднем за несколько периодов колебаний) их поверхности.

Недостаточная равномерность распределения как вводимой в аппарат энергии, так и частиц по объему аппарата приводят к существенному снижению качества продуктов [21, 22] и к непроизводительным затратам энергии, а в конечном счете – к нерациональному использованию сырьевых и энергетических ресурсов.

При обработке гетерогенных систем с легкодеформируемой дисперсной фазой (системы Ж-Ж и Ж-Г), когда на интенсивность протекания процесса влияет удельная поверхность, образуемая непосредственно в аппарате, необходимо учитывать **пятый принцип** синтеза ПА нового поколения: дисперсная фаза должна подвергаться непрерывному или периодическому воздействию с целью диспергирования и поддержания в заданных пределах дисперсного состава капель/пузырей, а при обработке капель – достаточного уровня внутреннего перемешивания в них.

При этом необходимо стремиться к снижению уровня турбулентности как побочного явления, возникновение которого сопровождается непроизводительными затратами энергии. Действительно, при использовании концепции турбулизации как средства повышения эффективности турбулизация жидкости во всем объеме аппарата проводится преднамеренно. Таким образом, вводимая в аппарат энергия трансформируется в энергию турбулентных вихрей, которая рассеивается быстро и по всему объему аппарата, совершая полезную работу лишь в некоторой части объема (зачастую не превышающей 3-5%) – вблизи поверхности частиц дисперсной среды. Очевидно, такой метод преобразования энергии чрезвычайно неэффективен, поскольку энергия затрачивается нецеленаправленно. На рис. 1 схематично представлен процесс трансформации энергии для случая намеренной турбулизации всего потока.

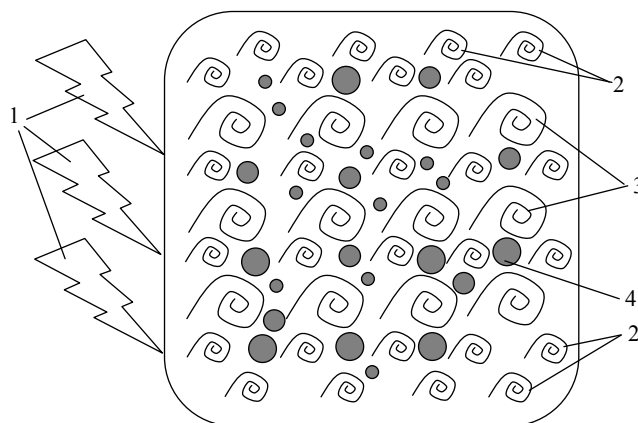
О росте энергозатрат, несоизмеримом с повышением эффективности процессов переноса энергии (в форме теплоты) и массы (вещества), с учетом аналогии процессов переноса, свидетельствует простой пример. Как известно, при турбулентном движении жидкости в трубках теплообменника число Нуссельта пропорционально числу Рейнольдса в степени 0.8:

$$Nu = \alpha d / \lambda \sim Re^{0.8} \quad (1)$$

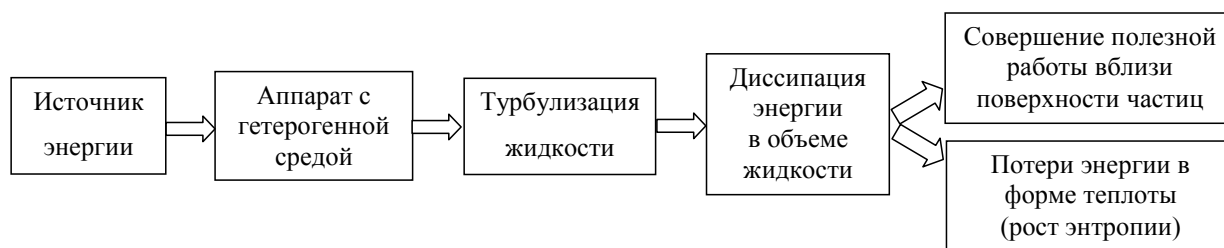
а потери энергии W пропорциональны числу Рейнольдса в кубе:

$$W = \Delta p \cdot Q = \lambda_a \frac{L}{d} \frac{\rho u^2}{2} \cdot uS \sim Re^3 \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) видно, что при увеличении скорости жидкости в 2 раза потери энергии возрастают в 8 раз, тогда как эффективность теплообмена увеличивается всего лишь в 1.74 раза.



а)



б)

Рис. 1. Схема преобразования вводимой в аппарат энергии при турбулизации всего потока: а – схема течения; б – этапы трансформации энергии. 1 – источник энергии; 2 – пристеночная турбулентность; 3 – турбулентные вихри вдали от стенок (почти изотропная турбулентность); 4 – частицы дисперсной среды.

Отсюда следует вывод о необходимости поиска таких способов организации технологических процессов, в которых турбулентность поддерживается на минимальном уровне. Это позволило бы резко сократить затраты энергии. Взамен турбулентного переноса энергии и массы (вещества) следует искать иные средства конвективного макропереноса.

На нецелесообразность турбулизации потоков указывал Дж. Дэвис [23], а А.А. Долинский [10] провел сравнение эффективности традиционных аппаратов и оборудования с дискретно-импульсным вводом энергии на примере процесса эмульгирования.

В данной работе предлагается осуществлять макроперенос за счет:

- вторичных течений, возникающих при колебательном движении тел в жидкости,
- возвратно-поступательно перемещения элементов дисперсной фазы относительно сплошной, сопровождающегося обновлением поверхностной пленки и перемешиванием внутри капель/пузырей;
- радиальной конвекции, обусловленной периодически изменяющимся поперечным сечением аппарата и порождаемыми им радиальными скоростями течения u_r (ПА проточного типа, рис. 2, [24-26]) либо наличием боковых течений в Т- и Г-образных элементах (горизонтальный ПА, [27]).

Для достижения интенсивного переноса энергии и массы за счет конвекции роль турбулентных вихрей могут взять на себя и некоторые другие физические объекты, как и вихри, не имеющие фиксированного объема и четких границ. К ним могут быть отнесены, например, стоячие волны, а также уединенные волны – солитоны, либо вихри, имеющие упорядоченную структуру.

Важно, чтобы пространственно-временные характеристики этих объектов были согласованы с параметрами системы хотя бы на одном уровне, а в идеальном варианте – на всех трех уровнях.

Таким образом, предлагается использовать альтернативную схему преобразования энергии, представленную на рис. 3.

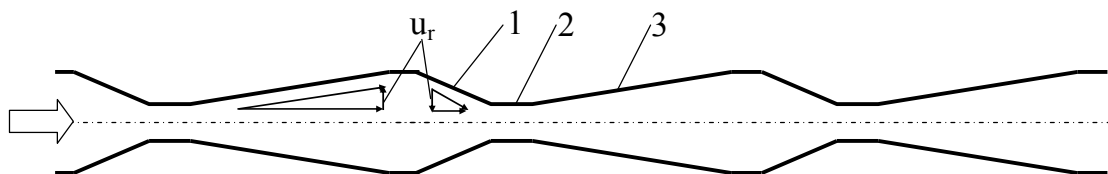


Рис. 2. Схема пульсационного аппарата проточного типа (ПАПТ).

1 – конфузор, 2 – горловина, 3 – диффузор.

Здесь обоснован **шестой принцип** синтеза ПА нового поколения: турбулентность не следует создавать преднамеренно; для интенсификации процессов целесообразней создавать управляемые течения, в которых энергия расходуется в основном на достижение полезного эффекта, то есть на повышение коэффициентов переноса. Более того, с целью снижения непроизводительных затрат энергии следует искать пути подавления турбулентности.

Доля непроизводительных затрат энергии зависит от геометрии аппарата, рабочих органов и частиц дисперсной среды (см. выше о трёх уровнях воздействия), физических свойств сред (плотности, вязкости, межфазного натяжения и так далее), а также – от временного и пространственного масштабов вводимой энергии.

Подчеркнем, что явление турбулентности не является необходимым условием протекания многих процессов.

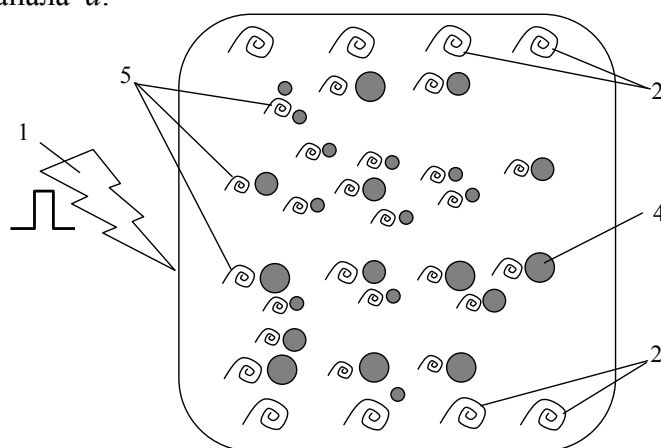
Турбулентность лишь сопровождает их в силу дестабилизации течения. Положительная ее роль заключается в усилении переноса энергии (в форме теплоты), импульса и массы (вещества) за счет конвекции турбулентных вихрей, которые принято называть турбулентным переносом.

Здесь предлагается не только не генерировать турбулентные вихри, распад которых приводит к потере значительного количества энергии, а напротив, избегать возникновения турбулентности либо подавлять ее. Это можно осуществлять каким-либо малозатратным способом, например, путем оптимизации геометрии аппарата). Подобные методы управления течением известны из гидромеханики, когда за счет хорошо обтекаемой формы летательного аппарата (внешняя задача) либо принятия специальных мер по турбулизации пограничного слоя, его отсасыванию и т. п. можно предотвратить отрыв кормовых вихрей и резко снизить его аэродинамическое сопротивление [28, 29]. Аналогичного эффекта можно достичь и в каналах (внутренняя задача) путем установки направляющих лопаток, дефлекторов и т. п. [30].

В химико-технологической аппаратуре можно выделить, по меньшей мере, два способа управления турбулентностью:

- задержка ее возникновения путем уменьшения сил инерции (создаются условия, при которых инерционные силы не достигают критического уровня, определяемого вязкими силами), по меньшей мере, на локальных участках аппарата;
- наложение на поток сплошной среды дополнительных силовых полей (центробежных, колебательных – звуковых, ультразвуковых, электромагнитных и т. д.), способных подавить развитие турбулентных вихрей за счет организации других форм течений жидкости (например, задержка перехода к турбулентному режиму в каналах с искривленной осью происходит благодаря возникновению вторичных вихревых токов, сохраняющих масштаб канала [30]), т. е. за счет организации упорядоченного течения.

В свою очередь, при заданных физических свойствах среды ($\nu = \text{const}$) существует два известных способа задержать возникновение турбулентности (разновидности способа 1): 1а) снизить среднюю скорость жидкости U ; 1б) уменьшить характерный линейный поперечный размер канала d .



а)



б)

Рис. 3. Схема преобразования вводимой в аппарат энергии: при направленном подводе энергии к месту совершения полезной работы:

а – схема течения; б – этапы трансформации энергии. 5 – локальная диссипация энергии вблизи поверхности частиц (остальные обозначения – те же, что к рис. 1).

Способ 1а сопряжен либо со снижением производительности оборудования (при заданном сечении аппарата), либо с увеличением его поперечных габаритов в результате параллельного соединения пучка труб.

Способ 1б используется в качестве одного из основных принципов при разработке так называемых миниаппаратов: минитеплообменников, минисмесителей и миниреакторов, в которых каналы имеют малый поперечный размер ($d \sim 0.1 \dots 1$ мм) [31].

В таких аппаратах даже при скорости $U \sim 10$ м/с и $\nu \sim 10^{-6}$ м²/с режим течения остается ламинарным, а интенсивность обменных процессов достигается за счет малых поперечных размеров течения в каждом из каналов; по этой причине длина минитеплообменников, например, не превышает 30-40 мм, и потери давления в них сравнительно малы (не более 1 МПа). Очевидными проблемами применения миниаппаратов, являются, во-первых, сложность их изготовления, во-вторых, жесткие требования к чистоте обрабатываемых сред от механических загрязнений и смолистых веществ.

Еще два серьезных недостатка миниаппаратов:

- они совершенно не приспособлены для обработки гетерогенных систем, содержащих твердые частицы с типичными для промышленности размерами и концентрациями;
- время пребывания в них составляет ~ 0.01 - 0.1 с, что непригодно для большинства массообменных процессов, а увеличение длины аппарата приведет к пропорциональному росту гидравлического сопротивления, а значит, и потерь энергии.

Поэтому более привлекательной является разработка такого оборудования, в котором при умеренных поперечных размерах d аппарата и достаточно больших скоростях U жидкости течение либо вообще не турбулизуется, либо турбулизация происходит, но локально, лишь в некоторых областях аппарата, причем именно там, где локальная турбулизация необходима для достижения существенного положительного эффекта (диспергирования капель и пузырей, тепло- и массообмена).

Примером может служить пульсационный аппарат проточного типа (ПАПТ) (см. рис. 2): турбулизация происходит в горловине, где и осуществляется диспергирование капель/пузырей, обновляется пограничный слой на поверхности частиц; в широкой же части поток тормозится, и при корректной геометрии аппарата можно добиться плавного расширения потока, способствующего подавлению турбулентных вихрей и переходу к ламинарному режиму.

Наконец, седьмой принцип синтеза ПА заключается в минимизации воздействия аппарата на окружающую среду, в частности, путем снижения вибрационной и любой динамической нагрузки на фундамент.

Далее в докладе на примерах [32-49] рассматривается, как эти принципы реализованы в аппаратах для различных видов гетерогенных сред: Ж-Т, Ж-Ж и Ж-Г. Заметим, что не во всех случаях в силу объективных причин удастся реализовать все сформулированные выше принципы. Например, ранее нами показано, что в ПА с частицами размером менее 1 мм (для жидкости со свойствами воды) резонансные колебания невозможны вследствие сильной диссипации [13]. За счет использования остальных принципов синтеза ПА все-таки удастся добиться высоких показателей эффективности, энерго- и ресурсосбережения для многих видов оборудования.

Условные обозначения: d – эквивалентный диаметр трубы, канала, м; L – длина трубы, м; Δp – потери давления в трубе, Па; Q – расход жидкости, м³/с; S – площадь поперечного сечения трубы, м²; U – средняя скорость жидкости, м/с; W – потери энергии, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; λ – теплопроводность жидкости, Вт/м·К; λ_r – коэффициент гидравлического трения трубы, отн. ед.; ν – кинематическая вязкость, м²/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; σ_z – осевые напряжения, Па; σ_r – радиальные напряжения, Па; Nu – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса.

Литература

- [1] Саркисов П.Д. Проблемы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии. *Хим. пром.* **2000.** №1. С.20-27.
- [2] Карпачева С.М. Интенсификация химико-технологических процессов применением пульсационной аппаратуры. *Журн. прикл. химии.* **1990.** Т.63. №8. С.1649-1658.
- [3] Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. *М.: Химия.* **1983.** 192с.
- [4] Фридман В.М. Ультразвуковая химическая аппаратура. *М.: Машиностроение.* **1967.** 212с.
- [5] Химико-технологическая аппаратура с использованием физических методов интенсификации процессов. Каталог. *М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ.* **1989.** 36с.
- [6] Городецкий И.Я., Васин А.А., Олевский В.М., Лупанов П.А. Вибрационные массообменные аппараты. *М.: Химия.* **1980.** 189с.
- [7] Куничан В.А., Севодина Г.И. Определение параметров колебаний для малогабаритных качающихся автоклавов. *Теор. основы хим. технол.* **1996.** Т.30. №3. С.243-245.
- [8] Куничан В.А., Севодина Г.И. Эмульгирование и массообмен в качающихся автоклавах. *Теор. основы хим. технол.* **1997.** Т.31. №6. С.586-590.
- [9] Долинский А.А., Накорчевский А.И. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии. *Пром. теплотехника.* **1997.** Т.19. №6. С.5-9.
- [10] Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энергоресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии. *Пром. теплотехника.* **1997.** Т.19. №4-5. С.13-25.
- [11] Абиев Р.Ш., Аксенова Е.Г., Островский Г.М. Новые разработки пульсационной резонансной аппаратуры для жидкофазных систем. *Хим. пром.* **1994.** №11. С.764-766.
- [12] Островский Г.М., Абиев Р.Ш. Пульсационная резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных средах. *Хим. пром.* **1998.** №8. С.468-478.
- [13] Абиев Р.Ш. Моделирование пульсационного экстрактора U-образного типа. *Хим. и нефтегаз. Машиностр.* **2000.** №8. С.11-14.
- [14] Абиев Р.Ш. Течение однородной несжимаемой жидкости в трубе с периодическим меняющимся сечением. *Журн. хим. и нефтегаз. машиностр.* **2003.** №1. С.6-10.
- [15] Абиев Р.Ш. Исследование течения газожидкостной системы в трубе с периодически меняющимся сечением. *Хим. пром.* **2003.** Т.80. №12. С.10-17.
- [16] Абиев Р.Ш. Исследование процесса пропитки тупиковых капилляров при гармоническом изменении давления в жидкости. *ЖПХ.* **2000.** Т.73. №7. С.1141-1144.
- [17] Абиев Р.Ш., Островский Г.М. Моделирование процесса экстрагирования из капиллярно-пористой частицы с бидисперсной структурой. *Теор. основы хим. технол.* **2001.** Т.35. №3. С.270-275.
- [18] Абиев Р.Ш. Исследование процесса экстрагирования из капиллярно-пористой частицы с бидисперсной структурой. *ЖПХ.* **2001.** Т.74. №5. С.754-761.
- [19] Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: Теория и практика. *М.: Машиностроение-1.* **2001.** 260с.
- [20] Патент РФ № 2060762. *Б.И.* **1996.** С.15.
- [21] M.R. Aboukhr. Einfluss niederfrequenter Fluidschwingungen auf die Nickelentfernung aus Prozesswasser: Dissertation Dr. rer. nat. *Martin-Luther-Universitaet. Halle-Wittenberg.* **1996.** P.111.
- [22] Островский Г.М., Брисовский И. Влияние дисперсии пористости зернистого слоя на эффективность межфазных обменных процессов. *Теор. основы хим. технол.* **1999.** Т.33. №3. С.247-251.
- [23] J.T. Davies. A physical interpretation of drop sizes in homogenizers and agitated tanks, including the dispersion of viscous oils. *Chem. Engng. Sci.* **1987.** Vol.42. No.7. P.1671-1676.
- [24] Патент РФ № 2064319. *Б.И.* **1996.** 21с.
- [25] Патент РФ № 2186614. *Б.И.* **2002.** 22с.
- [26] Патент РФ № 2264847. *Б.И.* **2005.** 33с.
- [27] Патент РФ № 2013114. *Б.И.* **1994.** 10с.
- [28] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. *М.: Наука.* **1974.** 712с.
- [29] Прандтль Л. Гидроаэромеханика. *М.: Издатинлит.* **1949.** 520с.
- [30] Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. *М.: Машиностроение.* **1975.** 559с.

- [31] V. Hessel, H. Löwe, A. Müller, G. Kolb. Chemical Micro Process Engineering. Processing and Plants. Wiley-VCH Verlag. **2005**. 651p.
- [32] Абиев Р.Ш. Опыт использования силовой пневмоавтоматики в оборудовании для переработки капиллярно-пористых частиц. *Гидравлика и пневматика*. **2001**. №1. С.26-28.
- [33] Абиев Р.Ш. Исследования и опыт промышленных испытаний пульсационных резонансных аппаратов для обработки систем жидкость – капиллярно–пористые частицы. *Хим. пром.* **2003**. Т.80. №7. С.21-27.
- [34] Патент РФ № 2077362. Б.И. **1997**. 11с.
- [35] Патент РФ № 2184593. Б.И. **2002**. 19с.
- [36] Патент РФ № 2184594. Б.И. **2002**. 19с.
- [37] Патент РФ № 2184595. Б.И. **2002**. 19с.
- [38] Патент РФ № 2187355. Б.И. **2002**. 23с.
- [39] Патент РФ № 2188057. Б.И. **2002**. 24с.
- [40] Патент РФ № 2205677. Б.И. **2003**. 16с.
- [41] Патент РФ № 2293600. Б.И. **2007**. 5с.
- [42] Патент РФ № 2297869. Б.И. **2007**. 12с.
- [43] Патент РФ № 2013114. Б.И. **1994**. 10с.
- [44] Абиев Р.Ш. Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии. СПб.: Изд-во ВВМ, 2006. 188 с.
- [45] Абиев Р.Ш., Шувалов А. Е., Сасова Я. В. Исследование вихревого струйного аппарата. Тез.докл. Междунар. конф. «Мат. методы в технике и технологии». Ярославль, ЯГТУ. **2007**. Т.5. С.122.
- [46] Патент РФ №2297260. Б.И. **2007**. 11с.
- [47] Галушко А. С., Абиев Р.Ш., Курилова Т. А. Массоперенос на границе газ-жидкость в аппарате с периодически изменяющимся поперечным сечением. Тез.докл. Междунар. конф. «Мат. методы в технике и технологии». Ярославль, ЯГТУ. **2007**. Т.3. С.92-93.
- [48] Галушко А. С., Абиев Р.Ш. Исследование гидродинамики в пульсационном аппарате проточного типа. Междунар. Конф. по химической технологии. Москва: ЛЕНАНД. **2007**. Т.2. С.186-189.
- [49] Абиев Р.Ш. Пульсационные аппараты нового поколения – энерго- и ресурсосберегающее оборудование химических производств. *Хим. пром. сегодня*. **2008**. №4. С.46-54.

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Балабанова М.Ю., Шабунина И.Г., Складнев Е.В.

Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: sklyadnev_ev@mail.ru

Проблема утилизации отходов сельского хозяйства для России является очень актуальной. В сельскохозяйственном производстве пищевых и кормовых продуктов образуется около 250 млн. тонн отходов в год, из них 150 млн. тонн приходится на животноводство и птицеводство, 100 млн. тонн – на растениеводство.

Особое внимание заслуживает проблема переработки отходов птицефабрик – переработка куриного помета. Огромное количество птицеферм (более 600 по всей России) производят в сутки каждая до 30 тонн помета. Своевременное принятие принудительно-предупредительных мер по утилизации этих отходов привело к тому, что многие птицефабрики, размещающиеся около крупных городов и поселков, стали оказывать негативное влияние на санитарно-экологическое состояние окружающей природной среды. Стало происходить заметное загрязнение прилегающих к птицефабрикам рельефа почв, водоемов, лесов и пастбищ.

Помет выделяется из организма птицы в виде дисперсной серой массы влажностью 10-75%. В нем содержится 0,8-1,2 % азота, потери которого в зависимости от сроков и условий хранения могут достигать 40%. Основной химический состав помета следующий, %: сухие

вещества 34,5-48,3; зола 14-40 (в том числе кальций до 8,5; фосфор – 2-3; сырой жир (эфирный экстракт) – 2,9-4,5; сырая клетчатка – 14,25; безазотистые экстрактивные вещества – 46-48.

В пивоваренной промышленности также имеется крупнотоннажный отход – пивная дробина, образующаяся в процессе фильтрации пивного сусла.

На предприятиях пивоваренной промышленности России (более 400 предприятий) ежегодно скапливается большое количество дробины влажностью 70-80%, которая содержит в среднем около 20% сухих веществ с высоким уровнем протеина, превышающим почти в 3 раза его содержание в ячмене. Количество сырой пивной дробины, получаемой на пивзаводах России, составляет 1,3 млн. т в год, а дополнительной технологической обработке с целью получения товарной продукции, подвергается не более 5 % от указанного количества.

Основной химический состав дробины пивной следующий: сырая зола – 0,8%, сырой протеин – 5,1%; сырая клетчатка – 3,3%, сырой жир – 1,5%, безазотистые экстрактивные вещества – 9,7%, остальное – влага.

Конечной целью работы является разработка технологии утилизации отходов пищевых производств с получением вторичных продуктов методами рециклинга и создание экспериментального (полупромышленного) образца установки для утилизации указанных отходов.

В состав рассматриваемых отходов органическое соединение - клетчатка (целлюлоза), термическая деструкция которой дает широкий ассортимент углеводородных веществ с различной молекулярной массой, представляющих интерес с точки зрения эффективной переработки отходов с получением топлива.

В связи с этим в качестве метода рециклинга отходов используется их химико-термическая переработка в диапазоне температур 350-550 °С и давлении 0-0,5 МПа без доступа кислорода воздуха. Для эффективной переработки отходов на экспериментальном образце установки необходимо в лабораторных условиях установить оптимальные режимы переработки отходов.



Рис. 1. Фотография лабораторной установки



Рис. 2. Образцы отходов производства пищевых продуктов

На лабораторной установке, представленной на рис. 1, проведен ряд экспериментов по переработке пищевых отходов (рис. 2) в виде птичьего помета (образцы с воронежского птицевосхоза) и дробины пивной (образцы с воронежского пивзавода - филиала компании «Балтика-Воронеж») со следующими характеристиками: влажность – 13,6% (птичий помет) и 59,2% (дробина пивная), зольность – 35,6% (птичий помет) и 7,5% (дробина пивная).

Лабораторная установка включает в себя горизонтальный реактор с ворошителем для проведения процесса химико-термической утилизации отходов и два конденсатора для конденсации компонентов газа (на первой ступени конденсации температура поддержи-

вается на уровне 120-140° С, на второй – 70-90° С), выделяющегося в процессе разложения отходов. Несконденсированный газ отводится на «факел» для сжигания. Выгрузка твердого остатка из реактора осуществляется через разгрузочный патрубок, снабженный шиберным затвором.

По результатам проведенных исследований получены зависимости выхода четырех видов вторичной продукции от температуры проведения процесса при отсутствии избыточного давления в реакторе, представленные на рис. 3-6.

Из графиков на рис. 4 следует, что с ростом температуры наблюдается снижение выхода конденсируемой части пирогаза на первой ступени конденсации и увеличение выхода неконденсируемой части пирогаза (газового топлива). Установлено, что в режиме переработки при 500 °С достигается полное разложение как пивной дробины, так и птичьего помета при практически минимальной длительности процесса пиролиза.

При дальнейшем увеличении температуры масса твердого остатка остается постоянной (рис. 5). При этом при более низких температурах проведения процесса (350-400 °С) в твердом остатке присутствуют часть неразложившегося сырья.

Длительность проведения экспериментов по химико-термической утилизации отходов в непрерывном режиме составила: для птичьего помета – 14,5-15,5 мин, для дробины пивной – 15-16,5 мин в зависимости от температуры процесса. Время окончания проведения эксперимента фиксировалось по прекращению выхода горючего газа («факел» на лабораторной установке погасал).

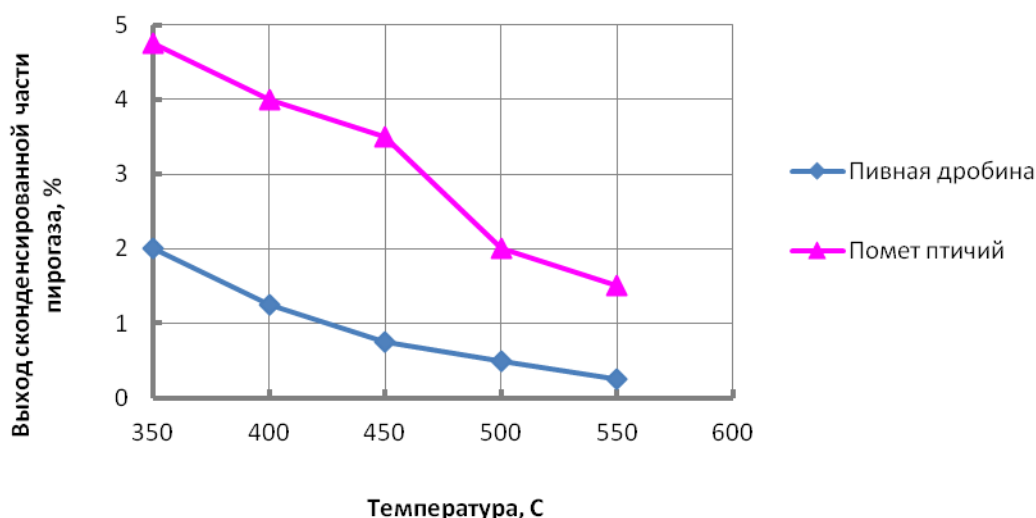


Рис. 3. Зависимость выхода сконденсированной части пирогаза от температуры ведения процесса на первой ступени конденсации

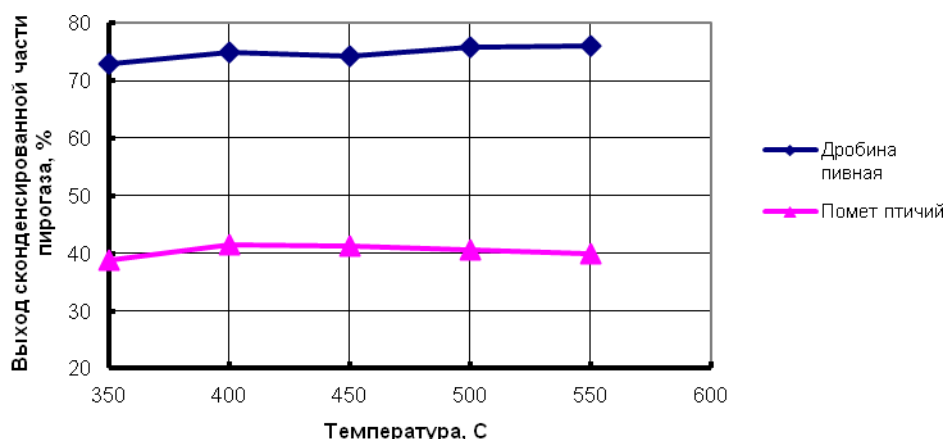


Рис. 4. Зависимость выхода сконденсированной части пирогаза от температуры ведения процесса на второй ступени конденсации

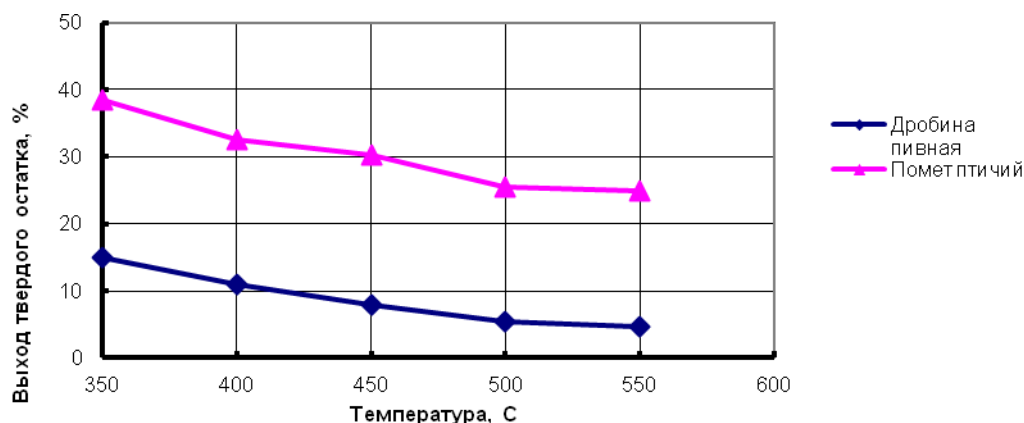


Рис. 5. Зависимость выхода твердого остатка от температуры ведения процесса

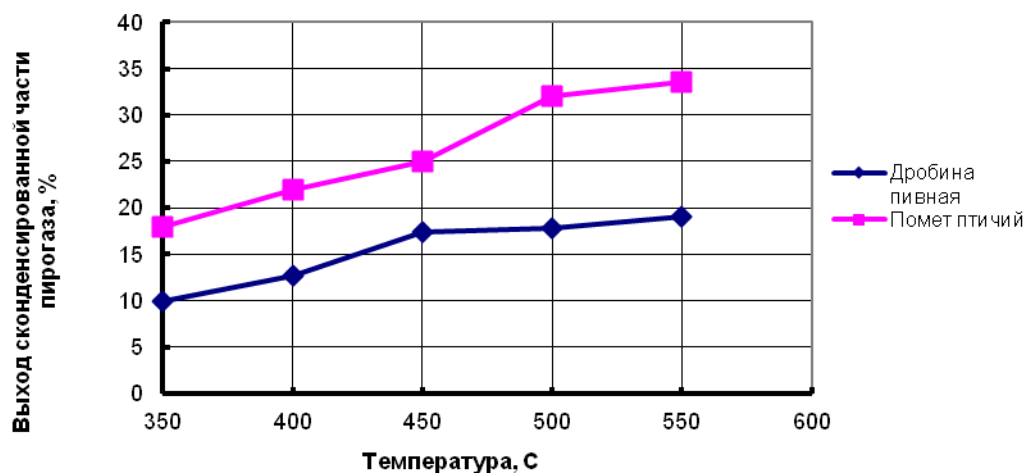


Рис. 6. Зависимость выхода несконденсированной части пирогаза от температуры ведения процесса

Для реализации практической переработки указанных видов отходов предлагается полупромышленная установка, схема которой представлена на рис. 7.

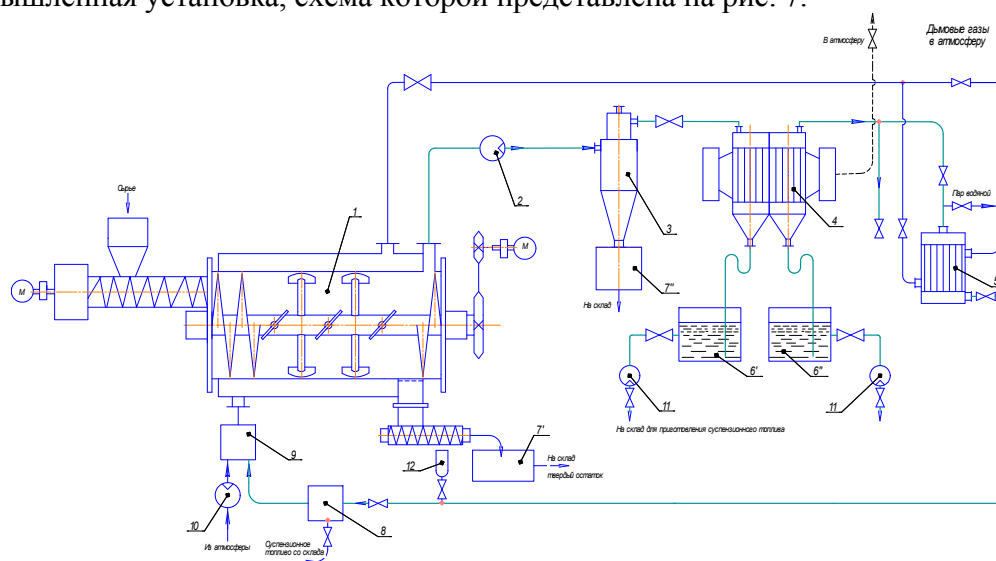


Рис. 7. Схема технологическая экспериментального образца установки для переработки и утилизации производственных отходов пищевых и кормовых продуктов

В составе установки содержатся: горизонтальный цилиндрический реактор 1, оснащённый наружной рубашкой с тепловой изоляцией, ворошителем с приводом в составе мотора-редуктора и цепной передачи, при этом опоры ворошителя охлаждаются водой (на схеме не показано), фильтр-циклон 2, конденсатор 3 со сборниками жидких фракций 6' и 6'', осушитель 4, комбинированная топка 5, сборники для твёрдых фракций 7' и 7'', смеситель 8, газодувка 9, вентилятор 10, насосы 11 и газовый баллон 12 с природным газом.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (Государственный контракт № 16.515.11.5008).

УСТАНОВКА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕРМОПЛАСТОВ И МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО ТОПЛИВА

Гетманова Т.А., Корнеева Ю.С., Андреев В.А., Шаповалов Ю.Н.
Воронежский государственный университет инженерных технологий.
E-mail: tema_1@mail.ru

Ежегодно потребление полимерной продукции в России увеличивается на 5-7%, соответственно возрастает и объем полимерных отходов [1]. И использованные полимерные изделия, находящиеся в составе этих отходов, не могут эффективно утилизироваться во вторичное сырье ввиду наличия загрязнений, удаление которых (промывка, сушка) весьма трудоемко и затратно, а в связи с их способностью не поддаваться коррозии и гниению, они имеют стойкую тенденцию к увеличению, занимая значительные территории.

Среди этих отходов значительную долю занимают отходы комбинированной тары из под соков. Такая тара, в чистом виде, состоит из: картона (75%), полиэтилена (20%) и алюминиевой фольги (5%).

В настоящее время предложены десятки различных технологий переработки отходов полимерных материалов [2]. Однако большинство из них непригодно для отходов потребления по причине их загрязненности. Наиболее подходящие для таких отходов являются термические методы переработки, в том числе пиролизные, так как они нечувствительны к загрязнениям сырья.

Данная работа выполнялась в рамках гранта Администрации городского округа г. Воронеж для финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме: «Разработка системы сбора и переработки твердых отходов в виде использованных изделий (тары) из картона, бумаги, ткани, термопластов, многослойных и ПЭТ-материалов на универсальной опытной установке мобильного варианта».

Цели настоящей работы: разработать научные и инженерные основы получения оптимальных технологических режимов и устройств для утилизации или переработки указанных отходов, путем их химико-термического разложения, с решением задач: а) создание экологически безопасных мобильных установок; б) выработки путей управления свойствами и количеством получаемой вторичной продукции посредством регулирования параметров процесса (температурой, давлением и условием конденсации парогазовых смесей и т.п.); в) создания установок указанного вида, работающих в условиях собственного энергообеспечения.

Главными задачами экспериментальных исследования являлись: определение видов и долей получаемой вторичной топливной продукции: газового, жидкого топлива и парафиновой фракции; установление возможностей использовать полученное вторичное топливо для компенсации энергозатрат на проведение самого процесса пиролиза.

Цели и задачи исследования выполнялись на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 1, в состав которой входили реактор 1, снабженный электрическим нагревателем 2, манометром 3, для обеспечения заданного режима утилизации, и термометром сопротивления 4 для контроля температуры, конденсатор I ступени высоко-температурной конденсации 5, емкость 6, конденсатор II ступени 7 и емкость для жидкой фракции 8. Конденсаторы I ступени 5 и II ступени 7 снабжены термопарой 9 и 10 для контроля температуры, соответственно, выходящей фракции и охлаждающей жидкости. В установке имеется вентиль 11, с помощью которого осуществляется сжигание и отбор пробы газовой фракции над вытяжной вентиляцией 12.

Установка работает следующим образом. Исходное сырье загружается в реактор 1, температура в котором достигает уровня 400...600 °С, за счет нагревателя 2, при которой происходит низкотемпературный пиролиз, образующий парогазовую смесь и твердый остаток.

Парогазовая смесь поступает из реактора 1 по газоходу в конденсатор 5, в котором конденсируются все высококипящие компоненты (в основном тяжёлое жидкое топливо и парафины), стекающие далее в емкость 6. Легкокипящие компоненты пирогаза, пары воды и неконденсируемый пиролизный газ (НПГ) выходят из конденсатора 5 с температурой 110...120 °С и поступают в конденсатор 8. Здесь конденсируются легкокипящие компоненты (керосин, газойль, соляровые масла и пр.) и пары воды, которые стекают в емкость 8.

Неконденсируемая углеводородная смесь – газовое топливо, основу которого составляют H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , предельные и непредельные углеводороды C_2-C_5 , отправляется через вентиль 11 на сжигание под вытяжной вентиляцией 12.

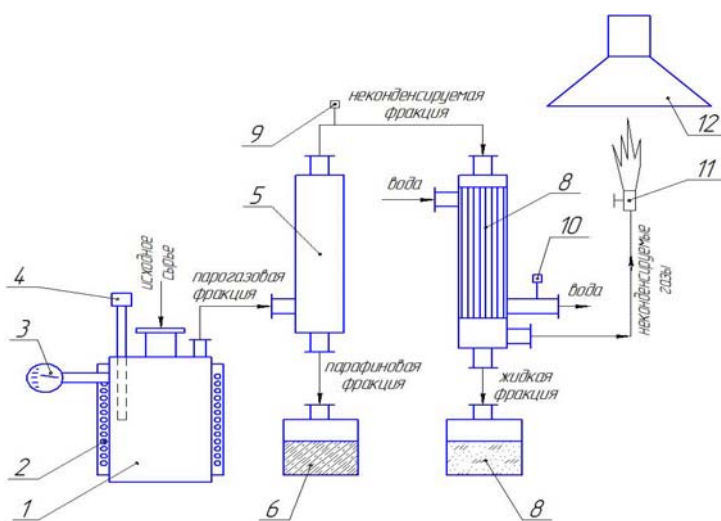


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Экспериментальные исследования выполнялись путём проведения процесса пиролиза для пяти значений температуры (414, 450, 500, 550 и 600 °С) при давлениях внутри реактора равных 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 МПа. Исходным сырьём являлись измельчённые использованные изделия из ПЭ (бутылки, флаконы и т.п.) и ламинированная тара (упаковка из под соков Тетра Пак).

Использовались две ступени конденсации исходного пирогаза (парогазовой смеси, выходящей из реактора), первая из которых предназначалась для получения расплавов парафинов и тяжелых жидких фракций, вторая – для конденсации легких жидких продуктов, включая воду, и выделение неконденсируемого пиролизного газа – газового топлива. Время пиролиза фиксировалось от начала процесса (появление пирогаза, который начинал гореть при выходе со второй ступени конденсации), до завершения горения этого газа.

Результаты экспериментов для ПЭ представлены в виде графических зависимостей количества вторичной продукции по её видам G_i , % от температуры t , °С пиролиза при

давлении в реакторе 0,1 и 0,3 МПа (рис. 2), графической зависимости средней продолжительности пиролиза τ , мин. от температуры t , °С пиролиза при тех же давлениях в реакторе (рис. 3) и графических зависимостей количества вторичной продукции по её видам G_i , % от давления в реакторе P , МПа (рис. 4).

Приведенные зависимости показывают, что с повышением температуры пиролиза при давлении в реакторе, близком к атмосферному, увеличивается выход газовой фракции, происходит снижение выхода жидкой фракции, возрастает выход парафиновой фракции при температуре 500-550 °С, а затем полностью разлагается при дальнейшем увеличении температуры.

Повышение давления процесса увеличивает выход газовой и уменьшает выход жидкой фракций, приводит к полному разложению парафиновой фракции. При температурах выше 500 °С время пиролиза резко сокращается, соответственно ведения процесса при таких температурах целесообразней с экономической точки зрения.

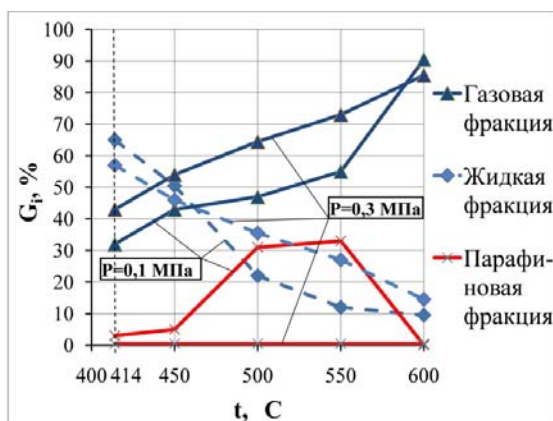


Рис. 2. Зависимости выхода продуктов пиролиза G_i , % от температуры t , °С

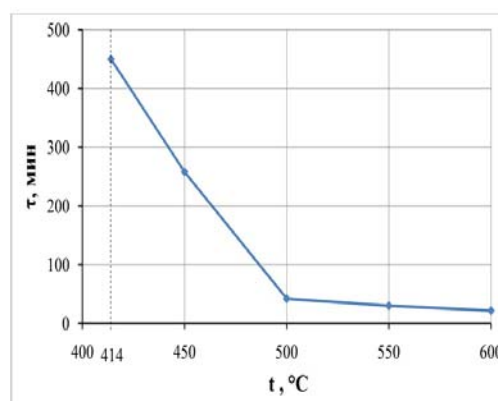


Рис. 3. Зависимость средней продолжительности пиролиза τ , мин от температуры t , °С

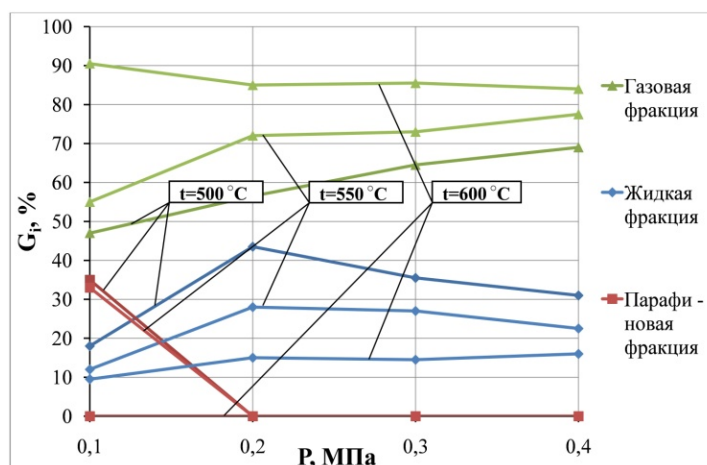


Рис. 4. Зависимости выхода продуктов пиролиза G_i , % от давления в реакторе P , МПа

Исследования показали, что можно регулировать соотношения выхода вторичной продукции путем изменения параметров пиролиза.

Для любого возможного соотношения выхода вторичной продукции можно подобрать оптимальные значения температуры и давления процесса. Все виды вторичной продукции являются горючими материалами. Наиболее удобными для использования в качестве топлива являются газовая и жидкая фракции. Предварительные расчёты показывают, что

полученного газового топлива достаточно для собственного энергопотребления. Продукцией, реализуемой стороннему потребителю, могут являться парафины и жидкое топливо.

Результат предварительных экспериментов по пиролизу комбинированной тары из подсоков показали, что при температуре проведения пиролиза 450 °С и давлении в реакторе равном 0,2 МПа выход газового топлива составляет 45%, жидкой фракции – 26%, из них 71% – пиролизная вода и 29% – жидкое топливо, а выход твердого остатка составляет 29%, из которых 83% – карбоксильный остаток, а 17% – алюминиевая фольга.

На основе проведенных исследований была предложена структурная схема экспериментального образца установки для переработки и утилизации отходов термопластов и ламинированной тары, представленная на рис. 5.

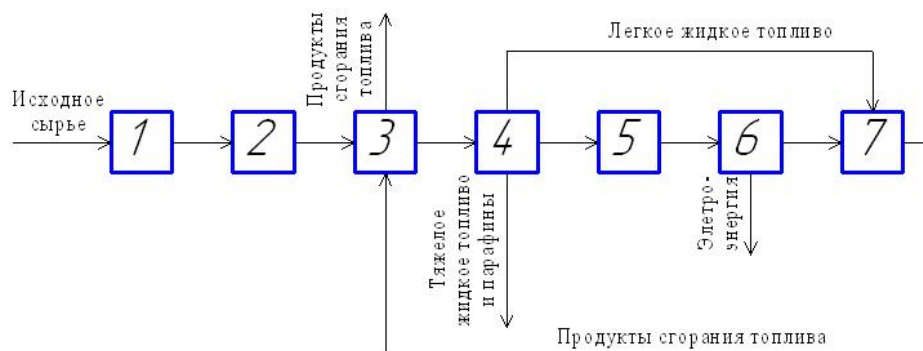


Рис. 5. Структурная схема экспериментального образца установки для переработки и утилизации отходов

Установка содержит блок подготовки и подачи сырья 1, состоящий из измельчителя исходного сырья, бункера-накопителя, снабженного ворошителем и устройством для отжима избыточной влаги, транспортера с гибким шнеком для транспортирования измельченного сырья от измельчителя до бункера-накопителя и от данного бункера-накопителя в шнековый питатель 2 горизонтального цилиндрического реактора 3, блок конденсации парогазовой смеси 4, состоящий из фильтра-циклона и двух конденсаторов, первый из которых, по ходу движения парогазовой смеси, является высокотемпературным, в котором конденсируются все высококипящие компоненты (в основном тяжелое жидкое топливо и парафины), а второй обычный водного охлаждения для конденсации легкого жидкого топлива.

Установка также содержит блок осушки неконденсирующегося пирогаза (газового топлива) 5, состоящий из осушителя двухкамерного, предназначенного для осушки газового топлива в непрерывном режиме и блок заготовки и использования газового вторичного топлива 6, состоящий из газгольдера стандартного вида для накопления и хранения газового топлива и газодизельной электростанции для получения электричества на собственные нужды или передачи ее стороннему потребителю. Для проведения самого процесса пиролиза и достижения собственного энергообеспечения установки часть неконденсируемого пирогаза и жидкого топлива, полученного из конденсатора водного охлаждения блока 4, сжигаются в топке 7.

Литература

- [1] Николаева Е. Переработка вторична. *The chemical journal*. **2003**. №4. С.35-39.
- [2] Вольфсон С.А. Кому нужны новые технологии, или Хождение по замкнутому кругу [Текст]: О методах переработки вторичного полимерного сырья. М: О-во «Знание» РСФСР. **1989**. 48с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ВАКУУМНО-ИМПУЛЬСНО-ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СУШКИ

Гумиров А.А., Бурцев С.А.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: vacuum@kstu.ru

Вакуумная сушка – одна из технологий консервации пищевых продуктов, гарантирующая длительное хранение. Продукты, высушенные и герметично упакованные, могут храниться несколько лет в неконтролируемых температурных условиях [1].

Существующие методы сушки можно разделить на две группы. К первой группе относят сушку путем соприкосновения влажного материала с подогретым воздухом или топочными газами.

Работа второй группы аппаратов основана на передаче тепла к материалу от нагретой поверхности плиты, змеевика, корпуса и т. п. В качестве теплоносителя обычно применяют водяной пар, а также электроэнергию при наличии электрических нагревателей или ламп.

Спроектирована экспериментальная установка, позволяющая отрабатывать технологию вакуумно-импульсно-осциллирующей сушки продуктов, которая состоит из следующих элементов:

- Ресивер – объем, в котором создается вакуум, необходимый для процесса вакуумно-импульсной сушки.
- Вакуумная камера – это часть вакуумной системы, предназначенная для создания условий для проведения сушки.
- Деформационный вакуумметр ВТИ – служит для наблюдения давления, создаваемого вакуумным насосом.
- НВВ-12 – водокольцевой вакуумный насос, необходимый для создания давления в вакуумной системе (низкий вакуум).
- Шаровой кран КШЗ – служит для слива воды из ресивера.
- Угловые газовые краны – служат для подсоединения к вакуумной камере откачной системы и промышленного фена.
- Напускной клапан КВР-25 – служит для напуска атмосферного воздуха в сушильную камеру.
- Промышленный фен НРЛ-1500 КЛ – необходим для проведения вакуумно-осциллирующего процесса сушки, путем обдува горячим потоком высушиваемого продукта.
- Все элементы смонтированы на единой раме. Общий вид установки представлен на рис 1.

Так же в данной работе разработан контейнер (рис. 2) объемом 2л, в который помещается высушиваемый продукт. Контейнер состоит из 2-х оснований, 8 шпилек, металлической сетки, являющейся оболочкой контейнера, змеевика нагревателя и подвижной крышки.

Для проведения процесса сушки высушиваемый материал необходимо хорошо вымыть, удалить подгнившие участки и хвостики, насухо протереть полотенцем, нарезать на кубики 5х5 мм. Это обеспечивает равномерное просушивание.

Поместив высушиваемый продукт в контейнер, мы помещаем его в вакуумную камеру.

Вакуумная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Рассмотрим процесс вакуумно-импульсно-осциллирующей сушки. Включаем вакуумный насос NW1 при этом клапаны VP1, VP2, VP3 и VF1 закрыты. Проводим процесс вакуумно-импульсной сушки продукта. Откачиваем ресивер до рабочего давления $P = 3,3$ кПа. Затем открываем VP2, тем самым создавая вакуумный импульс в сушильной камере. За счет большой разности давлений в ресивере и камере происходит выдавливание жидкости из продукта, что приводит к сушке продукта.

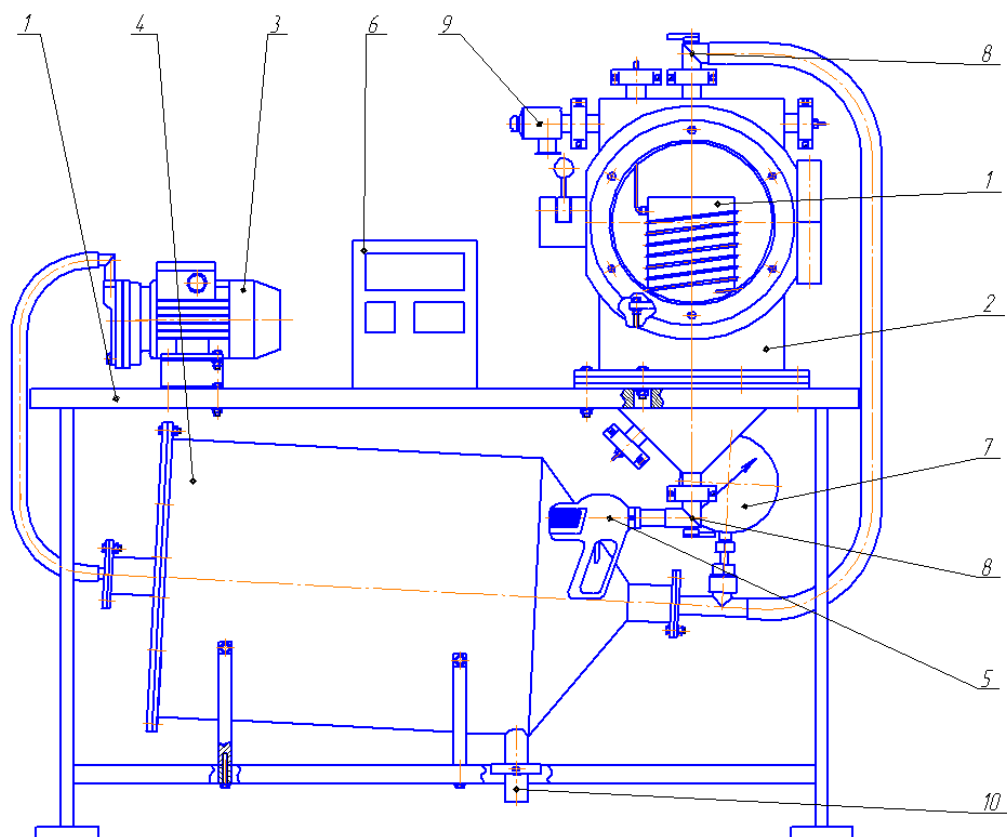


Рис. 1. Установка вакуумно-импульсно-осциллирующей сушки продуктов:

1 – рама, 2 – вакуумная камера, 3 – вакуумный насос, 4 – ресивер,
5 – промышленный фен, 6 – блок приборов, 7 – вакуумметр, 8 – кран,
9 – вакуумный клапан, 10 – шаровой кран.

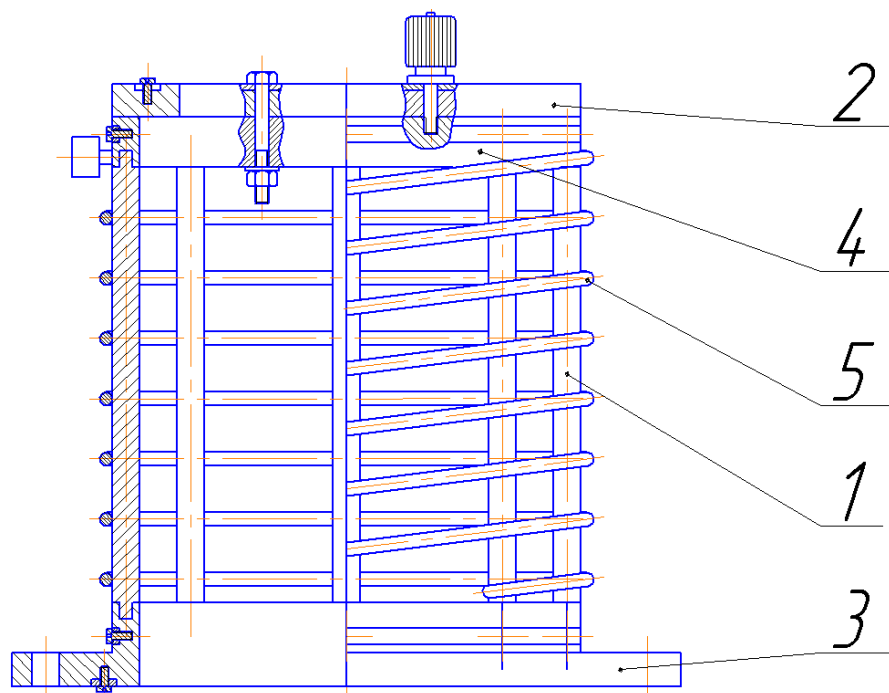


Рис. 2. Контейнер: 1 – шпилька (8 шт), 2 – крышка контейнера,
3 – нижнее основание контейнера, 4 – верхнее основание
контейнера, 5 – нагреватель, металлическая сетка (условно не показана)

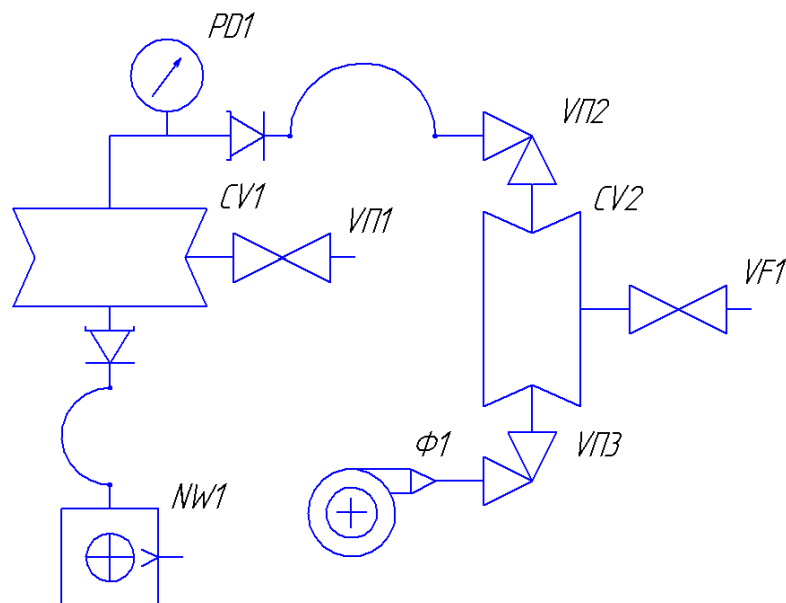


Рис. 3. Вакуумная схема экспериментального стенда

Выдержав определенное время продукт под вакуумом, закрываем VP2. Открываем напускной клапан VF1 для напуска в камеру атмосферного давления. Процесс импульсной сушки начинаем заново. Данный процесс повторяем определенное количество раз.

Далее проводим процесс вакуумно-осциллирующей сушки. Включаем промышленный фен Ф1 и открываем клапан VP3. Горячим потоком воздуха обдуваем продукт, разогревая его. Перекрываем VP3 и для уменьшения затрат энергии выключаем Ф1. Открываем VP2, что бы откачать вакуумную камеру до рабочего давления. Процедуру разогрева продукта и его последующую откачку повторяем до тех пор, пока не достигнем минимальной влажности продукта. Влагосодержание продукта определяется весовым методом, в процессе проведения сушки.

В конце процесса сушки сливаем накопившуюся в ресивере воду при помощи шарового крана VP1.

Литература

- [1] Садыков Р.А., Антропов Д.Н. Энергосберегающая технология сушки биоактивных продуктов. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. 2005. 172с.

РАЗРАБОТКА ДИСПЕРГИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ВЫСОКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Дмитриев А.В., Мадышев И.Н.

Нижнекамский химико-технологический институт, филиал Казанского национального исследовательского технологического университета. E-mail: ieremiada@gmail.com

Развернувшийся мировой финансовый кризис заставил существенно скорректировать основные параметры Энергетической стратегии России на период до 2030 г. Согласно расчётам Института энергетических исследований РАН, ожидается рост производства и потребления энергии в зависимости от сценария развития энергетики на 35-70% при существенном замещении нефти и газа возобновляемыми ресурсами и углём [1]. Такая ситуация предполагает разработку в самые кратчайшие сроки эффективных методов очистки газовых выбросов предприятий, работающих на тяжелых видах топлива.

Особенность таких процессов производства электроэнергии заключается в больших объемах газовых выбросов, превышающих в ряде случаев миллион кубических метров в час.

Это исключает применение для их очистки реализуемых в промышленных целях абсорбционных аппаратов, поскольку они обладают низкой пропускной способностью по газу (1,5-2,0 м/с), а увеличение их диаметра ведет к возрастанию неравномерности газа и жидкости по сечению аппаратов и существенному снижению эффективности очистки [2].

Единственно возможным способом решения проблемы может стать применение полых вихревых аппаратов, позволяющих обеспечить заданные требования очистки. Аппараты вихревого типа обладают рядом достоинств – высокая пропускная способность, малые габариты, низкое гидравлическое сопротивление и высокая эффективность.

В связи с этим при использовании полых вихревых аппаратов актуальным представляется организация распыливания жидкости в рабочую зону аппарата. В настоящее время распространено пневмогидравлическое диспергирование струи жидкости высокоскоростным газом. Однако данный способ имеет ряд недостатков, в частности, имеется нерабочая зона аппарата, в которой струя дробится на капли под действием газа, неравномерное распределение жидкости в рабочей зоне аппарата, наличие микрокапель, которые уносятся газовым потоком и др.

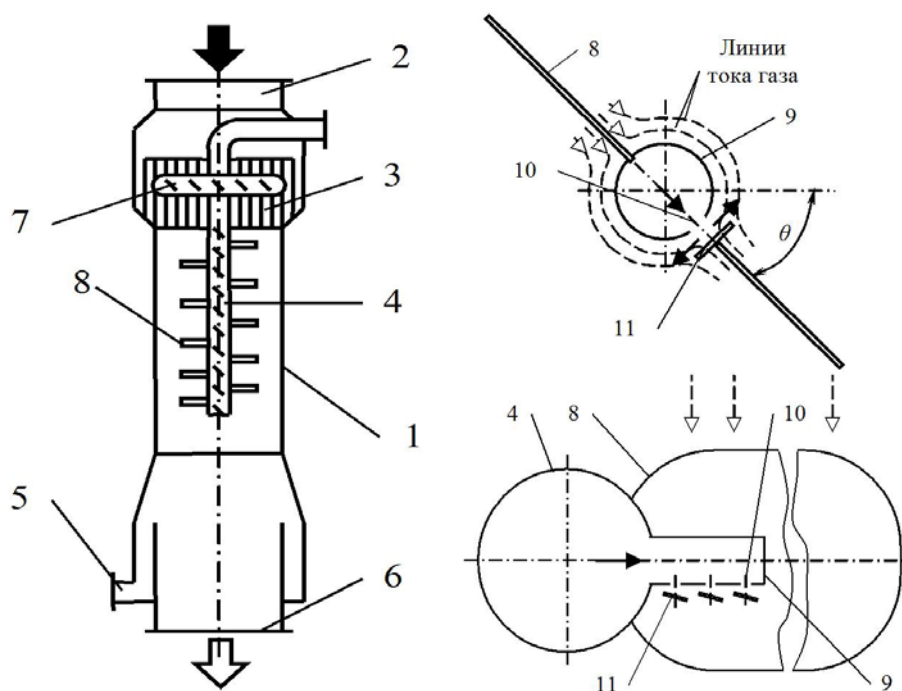


Рис. 1. Вихревой аппарат с разбрызгивающим устройством: 1 – корпус; 2 – штуцер для ввода газа; 3 – завихритель; 4 – узел ввода жидкости; 5 – штуцер отвода жидкости; 6 – штуцер отвода газа; 7 – коллектор; 8 – лопасти; 9 – патрубок распыла жидкости; 10 – отверстия; 11 – диски.

Поскольку от характеристик факела распыла, таких как диаметр капель, распределение их по размерам, зависят основные параметры, характеризующие работу аппаратов вихревого типа: энергетические потери и эффективность очистки газовых выбросов, решение проблемы авторы видят в применении разбрызгивающего устройства [3].

На рис. 1 представлена схема вихревого аппарата с разбрызгивающим устройством. Поток газа поступает в аппарат через штуцер 2.

Затем, проходя через завихритель 3, газ начинает вращаться вокруг центральной оси. Поток жидкости поступает в аппарат через узел ввода жидкости 4. Далее попадает в патрубки 9, которые расположены на расстоянии друг от друга по всей высоте трубы 4. Патрубки 9 имеют отверстия 10, через которые жидкость разбрызгивается в рабочую зону аппарата.

При столкновении потока жидкости с дисками 11 образуется пленка жидкости,

которая распадается на капли в газовом потоке. Образующиеся капли двигаются практически перпендикулярно потоку газа, благодаря чему происходит их вторичное дробление. Диски 11 крепятся к лопастям 8, расположенным под углом к плоскости, перпендикулярной оси трубы 4. При этом диски 11 расположены под углом к плоскости, перпендикулярной лопастям 8. Лопасты 8 поддерживают крутку потока постоянной по всей высоте контактной зоны аппарата.

Диаметр образующихся капель зависит от толщины ламеллы и скорости газового потока. Вращаясь вместе с газожидкостным потоком, твёрдые частицы перемещаются на поверхность капель жидкости. Под действием центробежной силы жидкость осаждается на стенке аппарата и стекает по нему в виде пленки.

При этом создается дополнительная зона контакта газовой и жидкой фазы. Газ, проходя через слой капель, очищается от твердых примесей, после чего удаляется из аппарата через штуцер 6. Отработанная жидкость удаляется через штуцер 5.

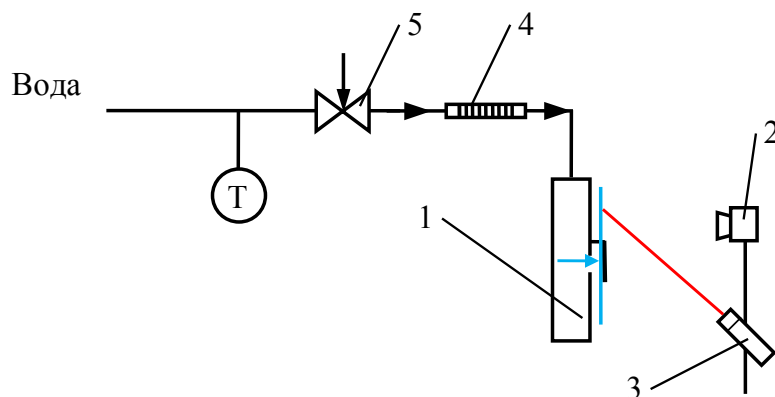


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по определению толщины плёнки жидкости:

1 – разбрызгивающее устройство; 2 – фотоаппарат; 3 – устройство для создания сфокусированного монохромного излучения в видимой области спектра; 4 – ротаметр; 5 – вентиль; Т – место измерения температуры жидкости.

Достоинством разбрызгивающего устройства [3] является минимальная затрата энергии на дробление потока жидкости и создание объёмного факела распыла, что приводит к минимизации нерабочей зоны в аппарате. Одной из важных характеристик работы данного диспергирующего устройства является толщина плёнки жидкости, которая определяет средний диаметр образующихся капель. Схема экспериментальной установки для измерения толщины свободной плёнки жидкости показана на рис. 2.

Таким образом, полые вихревые аппараты с разбрызгивающим устройством являются наиболее применимыми для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий, так как смогут обеспечить хорошее качество очистки при больших нагрузках.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ.

Литература

- [1] Макаров, А. А. Научно-технологические прогнозы и проблемы развития энергетики России до 2030 года. *Вестник РАН*. **2009**. Т.79. №3. С.206-215.
- [2] Скобло А.И. Процессы и аппараты нефтегазопереработки [Текст]: учебник для вузов. М.: ООО Недра-Бизнесцентр. **2000**. 677с.
- [3] Коньков О.А., Макушева О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. Пат. 102309 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/26. Разбрызгивающее устройство для аппаратов с интенсивным взаимодействием фаз.; заявитель и патентообладатель Казанский научный центр Российской академии наук. № 2010106576/22; заявл. 24.02.2010; опубл. 27.02.2011. Бюл.№6. 2с.

УСТАНОВКА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ГОРЕЛОГО ЛЕСА В РЕЖИМЕ СОБСТВЕННОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Ивакин О.Н., Саликов П.Ю., Шаповалов Ю.Н.

Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: paخان321@yandex.ru

Актуальность разработки в данной области довольно важна, особое место в России занимают отходы, образованные в горелых лесах, которые возникают в природе на сотнях и тысячах гектаров лесов. Основной спецификой здесь является, во-первых, необходимость обработки отходов на месте их образования (никто не будет возить горелый лес на большие расстояния); во-вторых, в лесах отсутствует, как правило, электроэнергия, требуемая для работы отдельных устройств установки; в третьих, при утилизации отходов горелого леса речь идет в большей мере об утилизации, чем для получения товарной продукции. Тем не менее, установка предусматривает производство угля.

Поэтому данное изобретение и предусматривает разработку установки для утилизации древесных отходов любого вида, работающих автономно в любом месте и производящих продукт в виде древесного угля и жидкой фракции (смеси углеводородных горючих жидкостей, ацетона, муравьиной и уксусной кислот, пиролизной воды (10-13% от общего выхода вторичной продукции при влажности древесины $W = 10\%$) и т.п.).

На экспериментальной установке периодического действия, в состав которого входит реактор обогреваемый электронагревателем, конденсатором для конденсации жидкой фракции и горелкой для сжигания несконденсировавшегося газа под вытяжкой. После проведения серии опытов на данной установке, были выявлены закономерности (рис. 1).

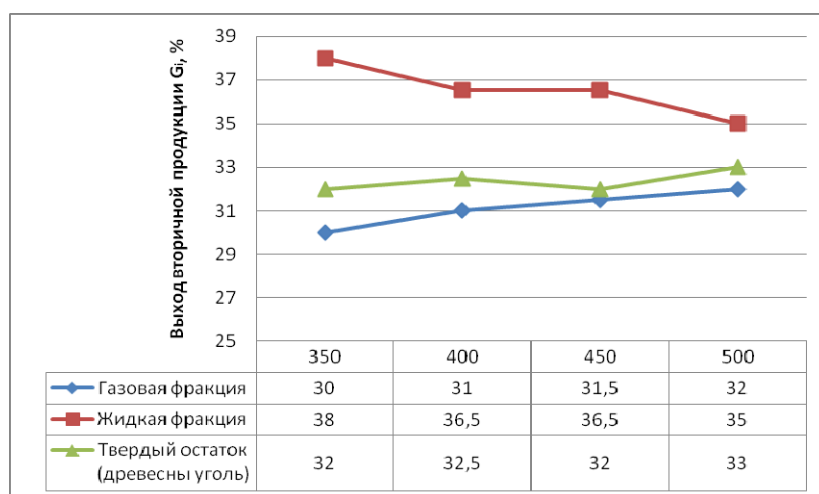


Рис. 1. График зависимости выхода вторичной продукции

Образующаяся в результате пиролиза жидкость сама по себе не горит, но и просто вылить её затруднительно. Появилась идея о создании суспензионного топлива на базе нашей же вторичной продукции (смешивание измельченного твердого остатка (древесный уголь) и нашей жидкой фракции), в итоге сжигание данной суспензии в топке реактора. Это позволяет обеспечить автономность работы установки.

Исследовалось также продолжительность пиролиза от температуры процесса (рис. 2).

По приведенным графикам можно сделать выводы:

- Повышение температуры пиролиза на выход вторичной продукции практически не влияет;
- При повышении температуры значительно сокращается время продолжительности пиролиза (рис. 2).

На основании проделанных работ, мы предлагаем схему технологической установки по переработки древесины (рис. 3).

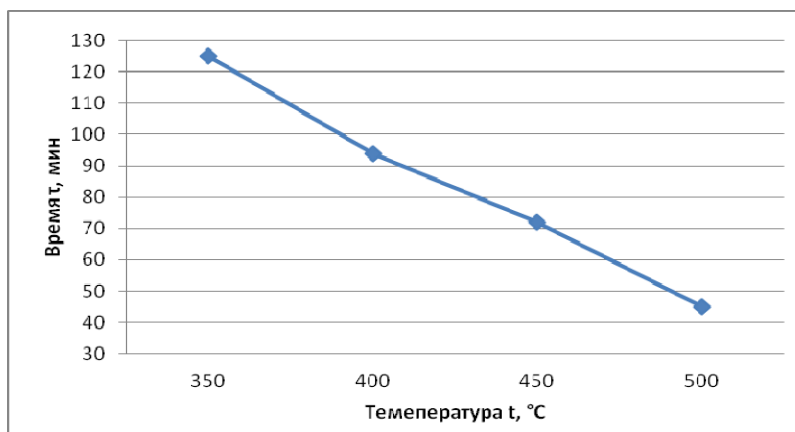


Рис. 2. График зависимости времени пиролиза от температуры

В состав установки входят: 1 – загрузочный бункер, 2 – реактор, состоящий из 4-х параллельно расположенных реторт, 3 – бункер разгрузки, 9 – шиберы с пневмоцилиндрами, для перекрытия реторт от бункеров загрузки 1 и разгрузки 3, 4 – фильтр-циклон, для очистки выходящего из реактора пиролизных газов от взвешенных частиц, такие, как «сажа», 5 – конденсатора со сборником 6, для всех возможных продуктов, которые могут сконденсироваться, газодувка 7, для нагнетания пиролизного не сконденсировавшегося газа в газовую горелку 10, топку 11 и вентилятор 8, служащий для подачи воздуха к горелке.

Подготовленные для утилизации отходы древесины, т.е. распиленные чурки и сучья деревьев, поступают в реактор 2 через загрузочный бункер 1 при помощи толкателя, после открытия шибер 9 реторт реактора 1. Для первого пуска реактора в топку 11 укладываются та же древесина, которая предполагается для переработки, этим самым осуществляется нагрев реактора до того момента, как начнет выделяться пирогаз. Пирогаз, образованный в результате термического разложения древесины, при помощи газодувки 7 нагнетается в фильтр-циклон 4, откуда поступает в конденсатор 5, вся жидкость, которая сконденсировалась, отводится в сборник 6 из которого используется для дальнейшего приготовления суспензионного топлива.

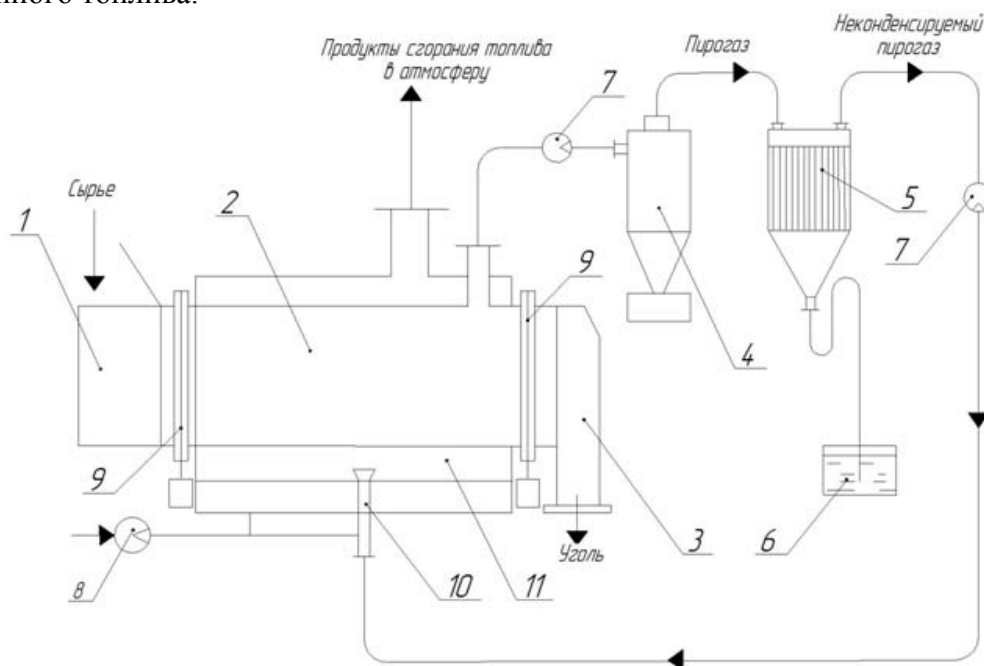


Рис. 3. Схема технологической установки по переработки древесины: 1 – загрузочный бункер, 2 – реактор, 3 – разгрузочный бункер, 4 – фильтр-циклон, 5 – конденсатор, 6 – сборник, 7 – газодувка, 8 – вентилятор, 9 – шибер с пневмоцилиндром, 10 – горелка газовая, 11 – топка.

Несконденсировавшийся пирогаз при помощи газодувки 7 подается в газовую горелку 10 и смешивается с воздухом, нагнетаемым при помощи вентилятора 8, для доведения топочных газов до необходимой температуры. По мере разложения древесины в реактор подается новая партия сырья, необходимого к переработке, а образованный уголь выводится через разгрузочный бункер 3, который перекрывается от реакторной зоны шибером 9. В дальнейшем часть данного угля поступает на создание суспензионного топлива, а другая, в качестве готового продукта поставляется потенциальному потребителю.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта Администрации городского округа г. Воронеж по тематике проблем городского хозяйства «Разработка мобильной установки для переработки отходов древесины с получением древесного угля в режиме собственного энергообеспечения».

Литература

- [1] Холманский А.С., Сорокина Е.Ю., Порев И.А., Курганов А.А. Быстрый пиролиз клетчатки: *Электронный журнал «Исследовано в России»*. **2004**. С.1297-1302.
- [2] Макарова Г.Н., Харлампович Г.Д. Химическая технология твердых горючих ископаемых. М.: *Химия*. **1986**.
- [3] Левин Э.Д. Теоретические основы производства древесного угля. М.: *Лесн. пром-сть*. **1980**. 151с.
- [4] Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: *Лесн. пром.-сть*. **1990**. 312с.

УСТАНОВКА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МАСЕЛ

Хоненко В.А., Локтева Е.С., Шаповалов Ю.Н.

Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: vguit@bk.ru

Отработанные масла составляют серьезную часть отходов производства. Они образуются практически во всех сферах хозяйственной деятельности. Углеводородные масла представлены моторными, машинными, трансформаторными видами. Растительные отработанные масла образуются в большей степени в организациях общественного питания, в частности, в создании т.н. «быстрого питания» - фастфуд, где очень широко образуется отработанное масло при жарении различной продукции.

Основная проблема утилизации растительных и углеводородных масел заключается в том, что объемы образуемых отходов в настоящее время не могут быть утилизированы или переработаны в полезные продукты в силу того, что, во-первых, предприятия, образующие отходы, и организации, использующие отходы исходного вида или перерабатывающие (утилизирующие) отходы у себя, не имеют требуемой техники, обладающей большой производительностью; во-вторых, хранение отходов требует весьма больших площадей (для создания хранилища, например для отработанного растительного или углеводородного масла).

Главными задачами утилизации отработанных машинных и растительных масел является:

- охрана окружающей среды;
- получение при утилизации отработанных масел вторичного жидкого топлива и определение его долевых составляющих;
- определение удельных затрат на пиролизную утилизацию[1].

Была поднята проблема об утилизации отработанных машинных и растительных масел в рамках проблем разработок для г. Воронежа. Получен грант Администрации городского

округа город Воронеж для финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме: «Разработка мобильной установки для утилизации отработанных углеводородных и растительных масел».

Для определения основных параметров указанных выше задач были проведены исследования на лабораторной установке периодического действия. Лабораторная установка состоит из реактора с электронагревателем, двух конденсаторов, сборников для жидкой фракции и газодувки.

Экспериментальные исследования выполнялись путем проведения процесса пиролиза отработанного индустриального и растительного масла при температурах (400-550°) и давлении 0 и 0,2 МПа внутри реактора.

Время пиролиза фиксировалось от начала процесса (появление пирогаза, который начинал гореть), до завершения горения этого газа. По окончании каждого опыта полученные виды вторичной продукции взвешивались, при этом доля неконденсируемого пирогаза определялась путем вычислений с использованием массы сырья, помещенного в начале эксперимента в реактор.

Результаты экспериментов представлены в виде графических зависимостей количества выхода продукта пиролиза от времени при давлениях 0 и 0,2 МПа.

Установлено также, что отработанные углеводородные масла: при температуре пиролиза 400-450 °С образуется выход газовой фракции 51, 7%, жидкой фракции – 36,3%, а сгущенного остатка – 12%. Время пиролиза составило 42 минуты.

У отработанных растительных масел при температуре пиролиза 400-450 °С выход газовой фракции составил 43,7%, жидкой фракции – 56,4%, время пиролиза составило 1 час.

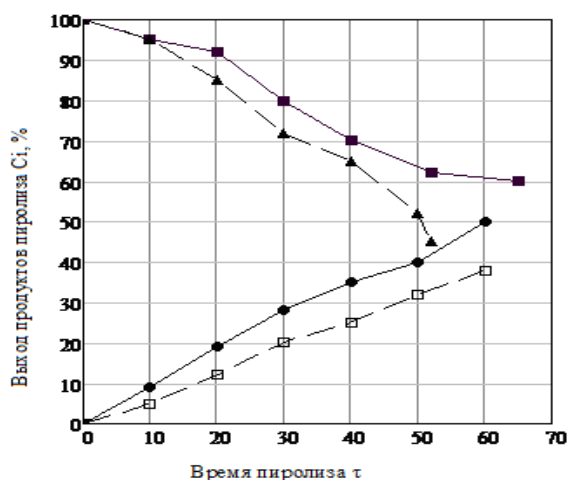


Рис. 1. Зависимость выхода продукта пиролиза от времени пиролиза при давлении $P = 0$ МПа

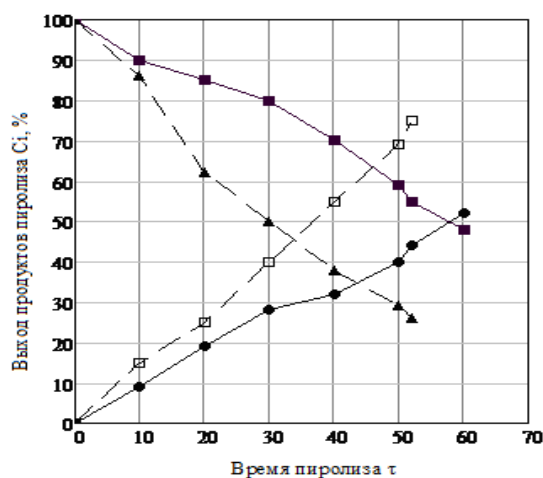


Рис. 2. Зависимость выхода продукта пиролиза от времени пиролиза при давлении $P = 0,2$ МПа

На рисунках обозначены: ■■■■ – жидкая фракция индустриального масла; ▲▲▲ – жидкая фракция растительного масла; ●●● – газовая фракция индустриального масла; □□□ – газовая фракция растительного масла.

На данной установке отработанные масла утилизируются путем химико – термического их разложения в пиролизном варианте без доступа воздуха.

Предварительные эксперименты, проведенные при давлении 0 МПа (рис. 1) и при давлении 0,2 МПа (рис. 2) в реакторе, показали, что повышение давления существенно увеличивает выход газового и жидкого топлива.

На основе изложенного была предложена установка опытно-промышленного назначения.

Ее схема приведена на рис. 3. Установка состоит из реактора 3 с рубашкой для обогрева, подогревателя сырья 2, конденсатора воздушного 4, со сборником 5 для жидкой фракции, сборников для исходной сырьевой массы 1. В состав установки входят так же стандартные изделия типа насосов 10 (две шт), фильтра для газовой фракции 11, газодувки 8, горелки для газового топлива 7, форсунки для сжигания жидкого топлива 9 [2].

Установка полностью обеспечивает себя энергией, поэтому стало возможным создать ее мобильный вариант, позволяющий работать в любом месте образования или сбора отработанных масел.

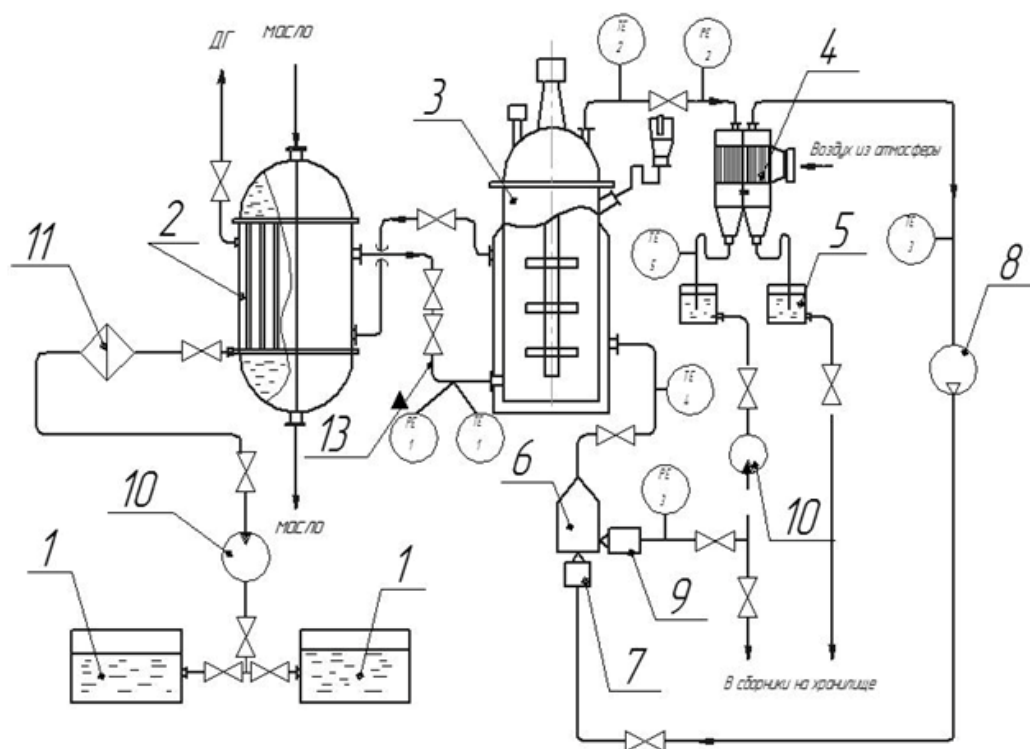


Рис. 3. Схема установки для утилизации отработанных масел

Установка позволяет утилизировать отработанные масла любого вида, а так же их смеси, независимо от состава и происхождения, т.к. пиролиз ведется в интервале температур 350-450 °С и может легко управляться с учетом свойств исходного сырья.

Литература

- [1] Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. *Справочник. Т.1 и Т.2. 2002.*
- [2] Пат. RU 2161176, кл. C10L1/04, C10G9/00. **2000.**

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПОРШНЕВЫХ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЕЙ

Калекин В.С.

Омский государственный технический университет.

E-mail: kalekinvc@mail.ru

Основным направлением обеспечения безопасности работ, проводимых в пожаро-взрывоопасных производствах химической, нефтехимической, газовой и горной промышленности, является использование силового пневмопривода вместо электрического, допускающего искрообразование.

Применение пневмодвигателей в горных машинах и комплексах при разработке глубоко залегающих полезных ископаемых связано не только с повышенной опасностью взрыва газа или пыли, но и наличием холодильного эффекта, роль которого существенно возрастает с увеличением глубины и повышением температуры подземных выработок [1, 2].

На предприятиях горнодобывающего комплекса для привода лебедок, тельферов стволовых машин, буровых кареток, породопогрузочных и погрузочно-транспортных машин широкое распространение получили поршневые пневматические двигатели с принудительным воздухораспределением. В сравнении с пневмодвигателями других типов поршневые пневмодвигатели отличаются хорошей пусковой характеристикой, допускают перегрузку, имеют меньшие утечки сжатого воздуха. В качестве источника для пневмодвигателей используется сжатый воздух с давлением на входе 0,4-0,63 МПа.

Основным производителем поршневых пневмодвигателей с кривошипно-шатунным механизмом в России в настоящее время является ЗАО «Родниковский машиностроительный завод» (г. Родники, Ивановской области).

В таблице приведены основные сравнительные характеристики пневмодвигателей, выпускаемых заводом и поршневых пневмодвигателей зарубежных стран.

Как следует из таблицы по удельным показателям – удельному расходу сжатого воздуха и удельной металлоёмкости отечественные пневмодвигатели не уступают лучшим зарубежным образцам, а по некоторым даже превосходят их.

Таблица. Поршневые пневмодвигатели

Пневмодвигатели	Технические данные				
	Рабочее давление, МПа	Мощность моделей конструктивного ряда, кВт	Число оборотов выходного вала, об/мин	Удельный расход воздуха м ³ /(кВт·мин)	Удельная металлоёмкость, кг/(кВт)
ЗАО «Родниковский машиностроительный завод», Россия П8-12	0,63	8	750	1,02	13,13
ЗАО «Родниковский машиностроительный завод», Россия П12-12	0,5	12	720	1,05	10,5
ЗАО «Родниковский машиностроительный завод», Россия П13-16	0,63	13	996	1,02	8,5
ЗАО «Родниковский машиностроительный завод», Россия П16-25	0,5	16	1500	1,3	6,25
Завод Острой, Чехия	0,4	5,9-55,1	700-1200	0,95-1,16	13,6
Заводы Петровицкой и Рыбницкий, ПНР	0,4	5,5	800	1,02	16,3
«Atlas Copco», Швеция	0,63	1,8-9,6	250-1300	0,95-1,09	10,9-14,96
«Holman», «Broom and Wade», BID Англия	0,38-0,56	2,2-36,8	500-1200	0,8-1,08	15,4-40,8

Для интенсификации производимых работ, внедрения и использования высокопроизводительного пневмооборудования требуется дальнейшее увеличение давления сжатого воздуха. Однако наличие принудительного золотникового газораспределения не способствует повышению экономичности работы поршневых пневмодвигателей на повышенном давлении [3].

Одним из путей совершенствования конструкций поршневых пневмодвигателей является замена принудительного воздухораспределения на самодействующие клапаны. Это позволит значительно упростить конструкцию пневмодвигателя, уменьшить и даже исключить утечки рабочей среды, повысить эффективность работы за счёт снижения потерь

на трение, обеспечить эффективное функционирование с незначительным изменением КПД на нерасчетных режимах, увеличить частоту вращения коленчатого вала [3, 4].

В связи с упрощением конструкций поршневых пневмодвигателей может быть расширена область их применения в химической и газовой промышленности для сбережения потенциальной энергии газообразных сред повышенного избыточного давления (отходов, побочных и промежуточных продуктов), покидающих технологическое оборудование перед последующей стадией использования [5].

Поршневые двигатели с принципиально новой системой газораспределения также могут найти применение при разработке и создании экологически чистого привода автомобильного транспорта за счёт использования энергии предварительно сжатых или сжиженных газов, инертных по отношению к окружающей среде [6].

Рабочие процессы, происходящие в цилиндре поршневого пневматического (газового) двигателя, связаны со схемой движения рабочего тела в проточной части [7].

Прямоточная схема движения рабочего тела в пневмодвигателе обеспечивается установкой впускных нормально открытых клапанов и выполнением выхлопных окон в стенке цилиндра в конце хода поршня. На рис. 1 представлен продольный разрез поршневого прямоточного пневмодвигателя.

Клапанная головка двигателя, включающая крышки клапана 3 и крышки цилиндра 6, присоединена к цилиндру 7.

Внутри головки размещен нормально-открытый самодействующий впускной клапан, содержащий кольцевой запорный элемент 4, ограничитель подъема 2, способный перемещаться по резьбе относительно крышки 3 для изменения максимальной высоты подъема запорного элемента, и пружины сжатия 5. Подача сжатого воздуха в двигатель производится через штуцер 1, ввёрнутый по резьбе в ограничитель подъема 2.

Работа пневмодвигателя производится следующим образом. При движении поршня 8 от верхней мертвой точки (ВМТ) происходит процесс наполнения цилиндра воздухом через нормально открытый впускной клапан. С увеличением скорости поршня увеличивается перепад давления между впускной полостью и цилиндром, растет газовая сила на запорный элемент 4 впускного клапана.

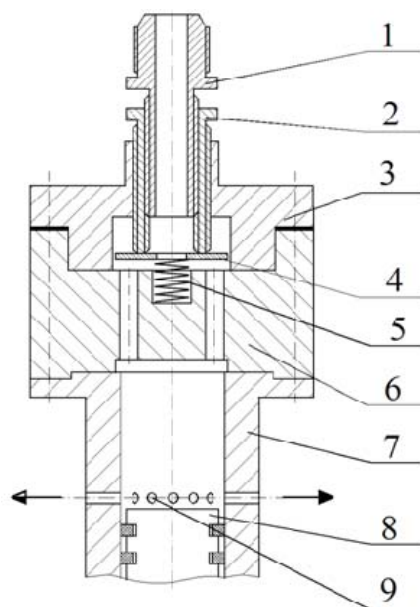


Рис. 1. Поршневой однорядный прямоточный пневмодвигатель:

1-штуцер подачи воздуха; 2-ограничитель подъема; 3-крышка клапана;
4-кольцевой запорный элемент; 5-пружина сжатия; 6- крышка цилиндра; 7-цилиндр;
8-поршень; 9-выхлопные окна

Преодолевая упругие силы пружины 5, запорный элемент 4 клапана закрывается. Поступление свежей порции воздуха в цилиндр прекращается. При дальнейшем перемещении поршня к нижней мертвой точке (НМТ) воздух расширяется с совершением внешней работы.

После открытия поршнем выхлопных окон 9 вблизи НМТ, расширившийся воздух выводится в атмосферу. При обратном движении поршня за счет сил инерции маховика к ВМТ, и при достижении в цилиндре 7 давления, близкого к давлению на входе, запорный элемент клапана под действием пружины 5 открывается, и цикл повторяется.

Теоретическая индикаторная диаграмма прямогопоршневого пневмодвигателя с самодействующим впускным клапаном приведена на рис. 2.

Точка 1 соответствует началу цикла. Поршень находится в верхней «мертвой» точке (ВМТ). Давление воздуха в цилиндре равно $p_{нач}$, впускной клапан открыт. Под действием газовой силы, обусловленной разностью давлений со стороны крышки и вала, поршень перемещается по направлению к нижней «мертвой» точке (НМТ), совершает механическую работу, передаваемую на вал кривошипно-шатунного механизма.

В процессе 1-2-2' происходит наполнение цилиндра пневмодвигателя сжатым воздухом. В точке 2' запорный элемент клапана начинает перемещаться к седлу. В точке 2 впускной клапан закрывается. При расширении воздуха в процессе 2-3 газовая сила, действующая на поршень, обеспечивает его движение к НМТ.

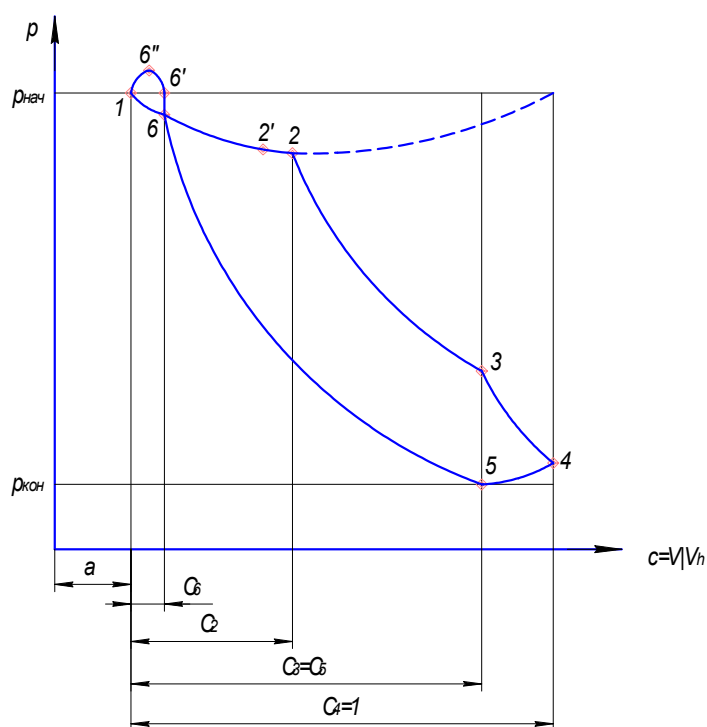
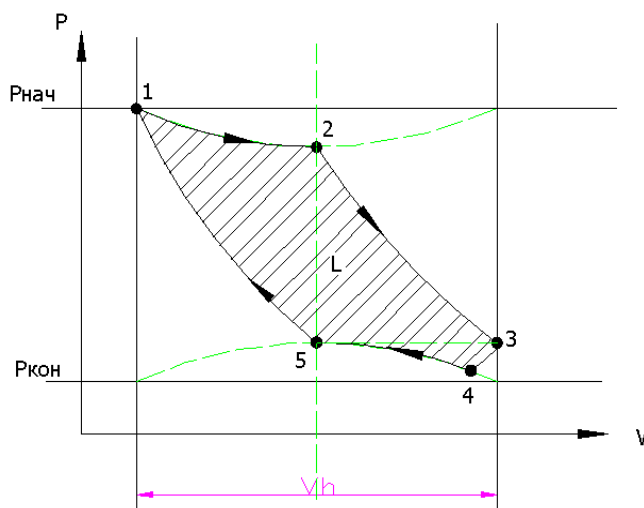


Рис. 2. Теоретический рабочий процесс прямогопоршневого пневмодвигателя (диаграмма давление-относительный ход поршня)

В точке 3 поршнем открываются выхлопные окна, рабочая камера сообщается с полостью выпуска или атмосферой. В процессе выхлопа воздуха 3-4 механическая энергия также воспринимается механизмом движения. Давление воздуха в точке 4 выше $p_{кон}$, т.к. не вся поступившая масса воздуха успевает покинуть цилиндр. При обратном ходе поршня за счет энергии, накопленной маховиком (однорядная машина), часть воздуха выталкивается из цилиндра.

В точке 5 выхлопные окна перекрываются поршнем, начинается процесс сжатия воздуха, оставшегося в цилиндре. Сжатие происходит до давления p_6 , достаточного для открытия впускного клапана.

Непрямоточная схема движения воздуха может быть реализована в пневмодвигателе с нормально открытыми впускными и выпускными клапанами. При положении поршня в ВМТ впускной клапан открыт, выпускной клапан закрыт под действием давления воздуха в цилиндре. Под давлением свежей порции воздуха $p_{нач}$, поступающей в цилиндр, поршень совершает движение в сторону НМТ, происходят процессы 1-2 наполнения и 2-3 расширения (рис. 3).



универсального интерфейсного преобразователя был выбран и модуль E14-440, являющий современным универсальным программно-аппаратным устройством со стандартной последовательной шиной USB. Поддержку модуля E14-440 осуществляет законченный программный продукт L-GRAFH, представляющий собой многоканальный осциллограф-регистратор.

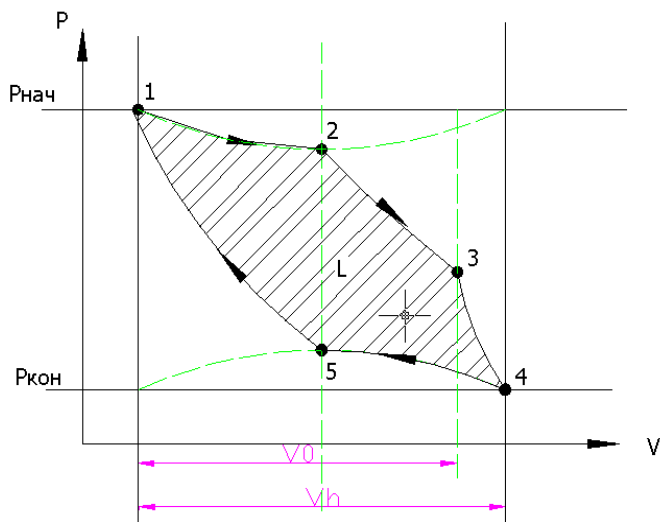


Рис. 4. Теоретический процесс пневмодвигателя с комбинированной схемой движения воздуха

Производилась регистрация быстроменяющихся давлений в цилиндре пневмодвигателя, впускной полости, отметка верхней и нижней мертвых точек, диаграмм движения запорного элемента клапана. Измерялись внешние параметры: давление, температура и расход сжатого воздуха (ротаметр KROHNE) на входе, температура отработанного воздуха на выходе.

На основе математических моделей рабочих процессов, совмещённых с динамикой механизмов движения пневмодвигателей, и разработанного программного средства [9] произведён анализ влияния конструктивных параметров однорядного и Ш-образного пневмодвигателей с самодействующими клапанами при различных схемах воздухораспределения, внешних нагрузках, начальных давлениях сжатого воздуха в установившихся и неустановившихся режимах функционирования.

В результате экспериментальных и теоретических исследований было установлено, что:

- однорядный прямоточный пневмодвигатель может достаточно устойчиво работать с частотой вращения от 300 об/мин до 1600-1700 об/мин;
- пневмодвигатель, выполненный на базе трёхрядного, Ш-образного поршневого компрессора развивал обороты коленчатого вала от 100 до 2500-2600 об/мин;
- характеристики пневмодвигателя (мощность, частота вращения вала, КПД), обусловленные изменением давления сжатого воздуха на входе при соответствующей внешней нагрузке, определяются соотношением конструктивных параметров элементов впускного клапана, изменение их при установленных жёсткостях пружин обеспечивается регулированием высоты подъёма запорных элементов;
- непрямочная схема воздухораспределения может быть рекомендована для применения в условиях строго ограниченного подбора конструктивных параметров нормально открытых впускного и выпускного клапанов;
- наилучшие показатели работы пневмодвигателей обеспечиваются с прямоточной и комбинированной схемами движения воздуха. Эти схемы сопоставимы по удельному расходу, но комбинированная схема имеет более широкий устойчивый диапазон функционирования до 30% в сторону увеличения и уменьшения начального давления в сравнении с диапазоном, характерным для прямоточной схемы;

- минимальный удельный расход сжатого воздуха для прямоточной и комбинированной схем воздухораспределения имеет место при расположении нижнего края выхлопных окон, соответствующего положению поршня в нижней мертвой точке. Смещение положения окон на 0,2 относительного хода поршня в сторону ВМТ приводит к росту удельного расхода сжатого воздуха до 10%;
- для повышенных давлений, начиная от 0,8 МПа, отношение хода поршня к диаметру цилиндра S/D при сохранении объёма, описываемого поршнем за один оборот, должно составлять 0,8-0,85, для меньших давлений это отношение следует принимать равным 0,6-0,7. Отклонения S/D от рекомендованных значений на 0,1 в меньшую сторону приводит к увеличению удельного расхода сжатого воздуха на 60-70%, а в большую сторону – на 20-30%;
- величина относительного мертвого пространства α для прямоточной и комбинированной схем составляет 0,3-0,4. При уменьшении $\alpha \leq 0,2$ удельный расход возрастает в 2-2,5 раза. Увеличение α до 0,6 приводит к уменьшению мощности на 7-10% и увеличению удельного расхода сжатого воздуха на 5-10%;
- поршневые пневмодвигатели нового типа способны развивать более высокие частоты вращения вала (в 2-2,5 раза), чем двигатели с принудительным воздухораспределением.

В целом пневмодвигатели с самодействующими клапанами не уступают зарубежным и отечественным образцам с принудительным воздухораспределением. При давлениях сжатого воздуха порядка 0,63 МПа удельный расход пневмодвигателей нового типа снижен на 20-25%.

Важным фактором, обеспечивающим ускорение внедрения конструкций пневмодвигателей нового типа, а также снижения их себестоимости и материалоемкости, является использование имеющихся унифицированных единиц и создание на их основе типоразмерных рядов новых конструкций. Это обстоятельство позволяет считать целесообразным применение унифицированных компрессорных баз для разработки пневмодвигателей нового типа. Использование серийно выпускаемых унифицированных компрессорных баз будет способствовать сокращению сроков и затрат на проектирование и изготовление.

Литература

- [1] Кусницын Г.И. Пневматические двигатели горных машин и механизмов. М.: Углетехиздат. **1953**. 87с.
- [2] Зиневич В.Д., Гешлин Л.А. Поршневые и шестеренные пневмодвигатели горно-шахтного оборудования. М.: Недра. **1982**. 199с.
- [3] Калекин В.С. Рабочие процессы поршневых компрессорно-расширительных агрегатов с самодействующими клапанами: Дис. ... д-ра техн. наук. Омск. **1999**.
- [4] Калекин В.С., Бычковский Е.Г., Ваяншов А.Д., Калекин В.В. Поршневой пневмодвигатель с самодействующим впускным клапаном. *Химическая техника*. **2002**. №1. С.27-29.
- [5] Прилуцкий А.И. Применение поршневых расширительных машин в установках утилизации энергии сжатого природного газа. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. **2008**. №3. С.26-30.
- [6] Туренко А.Н., Пятак А.И., Кудрявцев И.Н. и др. Экологически чистый криогенный транспорт: современное состояние, проблемы. *Вестник ХГАДТУ. Сб. науч. Тр., Харьков*. **2000**. Вып.12-13. С.42-47.
- [7] Калекин В.С., Калекин Д.В. Поршневые пневмодвигатели с самодействующими клапанами. Актуальные проблемы химической технологии и подготовки кадров. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа: УГНТУ. **2006**. С.253-258.
- [8] Калекин В.С., Калекин Д.В. Поршневой пневмодвигатель с впускным самодействующим клапаном. *Компрессорная техника и пневматика*. **2011**. №2. С.20-25.
- [9] Загородников А.П., Калекин В.С., Калекин Д.В. Программное средство для рационального конструирования поршневых пневмодвигателей и агрегатов. *Компрессорная техника и пневматика*. **2012**. №1. С.34-40.

ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ИСХОДНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО БАЗОВЫХ МАСЕЛ

Буканова А.С., Науашев А.Н.

Атырауский институт нефти и газа. Республика Казахстан. E-mail: aing-atr@nursat.kz

Нефтяные масла представляют собой смесь углеводородов, содержащих 20-60 атомов углерода молекулярной массы 300-750, выкипающих в интервале 300-650 °С. Главным процессом производства нефтяных масел, является вакуумная перегонка мазута, в результате которой получают масляные дистилляты и гудрон (концентрат). Все последующие стадии производства масел сводятся к очистке этих продуктов от смолисто-асфальтеновых веществ, полициклических углеводородов с короткими боковыми цепями: высокомолекулярных парафиновых углеводородов, сера, азот, кислородосодержащих соединений, ухудшающих эксплуатационные свойства масел.

Основное назначение процесса вакуумной перегонки мазута масляного профиля (ВТМ) - получение узких масляных фракций заданной вязкости, являющихся базовой основой для получения товарных масел.

Многие показатели качества (вязкость, индекс вязкости, нагарообразующая способность, температура вспышки и др.) товарных масел, а также технико-экономические показатели процессов очистки масляного производства во многом предопределяются качеством исходных нефтей и их масляных фракций. Поэтому в процессах ВТМ, по сравнению с вакуумной перегонкой топливного профиля, предъявляются более строгие требования к четкости погоноразделения и выбору сырья.

Жердева Л.Г., Вознесенская Е.В., Карасева А.А. и др. [1] придают решающее значение вакуумной перегонке, как главному процессу получения светлых масляных дистиллятов с узкими пределами выкипания (50- 60 °С).

Шарапов В.И., Семенидо Е.Г. [2], С.8.Крейн и др. [3] считают регулирование и сужение фракционного состава важнейшей мерой для коренного улучшения качества загущенных моторных и маловязких масел.

Креймер М.Л. [4] подчеркивает, что отсутствие отгонных колонн для масляных фракций на отечественных установках обуславливает широкий фракционный состав дистиллятов и низкие температуры вспышки.

Одинцов О.К. с сотрудниками [5] сопоставляют работу промышленных вакуумных колонн, указывая как оптимальный вариант, двухколонную схему перегонки мазута.

Джорман Х.Г. [6] отмечает важное значение применения узких масляных фракций, как сырья для процессов экстракции; он указывает, что выделение наиболее вязких масел требует создания максимального вакуума в нижней секции колонны, а поскольку вакуум зависит от перепада на тарелках колонн, наилучшим условием для выделения фракций является самостоятельная секция для каждого погона.

Выход рафинатов селективной очистки из дистиллятов узкого фракционного состава выше на 3-5% (масс.) [7].

Однако в вопросах фракционного состава исходного сырья для производства масел вообще и способах улучшения фракционного состава масел нет единодушия.

Славинский Д.М., Кацнельсон М.М. [8], наоборот, подвергают сомнению необходимость жестких регламентаций в отношении фракционного состава, поскольку сужение фракций требует новых приемов и дополнительных затрат.

Имеются сведения о преимуществах внедрения на установке ЭЛОУ АВТ перекрестно-точной регулярной насадки в колонне К-4, что позволяет повысить производительность вакуумного блока по сырью на 10%, вдвое увеличить разделительную способность колонны (с 5,6 до 11 теоретических тарелок) [9], за счет этого углубить отбор масляных дистиллятов на 3-5 мас. % на нефть и сузить их интервал выкипания со 130-140 до 100-110 °С.

Высокие значения КПД насадки в широком диапазоне нагрузок по плотности орошения и F-фактору [10] доказали возможность применения данного типа контактных устройств в процессах с повышенными требованиями к разделительной способности.

Особенностью предложенной технологии фракционирования мазута является возможность работы колонны К-4 по различным схемам (в соответствии с изменением ассортимента вырабатываемых основ базовых масел), что достигается изменением уровня отбора веретенного дистиллята и схемы организации дополнительного теплосъема орошением.

При фракционировании мазута конструкции перекрестно-точных регулярных насадок позволяют достичь требуемых результатов, как по глубине отбора дистиллятов, так и по четкости ректификации с получением качественной продукции. Это позволяет рекомендовать перекрестно-точные насадки для решения проблем энергосбережения в процессах вакуумной перегонки мазута.

В общем случае производство высокоиндексных базовых масел сводится к получению концентрата масляных углеводородов определенного группового состава. Наиболее желательными компонентами масла по вязкостно-температурным свойствам являются изопарафиновые углеводороды с длинными разветвленными цепями, алкилированные нафтенновые, ароматические и нафтенно-ароматические углеводороды с длинными малоразветвленными цепями, являющиеся носителями вязкости и одновременно обеспечивающие высокие значения индекса вязкости [11, 12].

В данном сообщении приведены результаты анализов отобранных образцов депарафинизированных масел, полученных из вакуумных газойлей широкого (350-500 °С) и узкого фракционного состава (370-450 °С) нефтей Казахстана [13]. Опыты по депарафинизации проводили при температуре фильтрации – минус 27 °С, кратность растворитель – сырье была 4:1 на стадии кристаллизации и 1,5:1 на стадии промывки.

Табл. 1. Выходы продуктов депарафинизации, характеристика и групповые химические составы депарафинизированных масел (350-500 °С)

Показатели	Вакуумный газойль нефти Кумколь (350-500 °С)	Вакуумный газойль нефти Кенкияк (350-500 °С)
Выходы, %		
депарафинизированного масла	70,1	59,9
гача	29,9	40,1
Качественная характеристика масел		
плотность при 20°С, кг/м ³	898,1	898,4
содержание серы, %	0,15	0,56
вязкость, сСт		
при 100°С	6,20	6,05
при 40°С	43,20	42,10
индекс вязкости	86	83
температура застывания, °С	-12	-12
Состав, %		
парафино-нафтенны	67,0	66,9
легкие ароматические	13,5	14,1
средние ароматические	7,9	6,3
тяжелые ароматические	8,0	7,7
смолы I	1,2	1,6
смолы II	2,1	3,4
Сумма тяжелых АУ и смол, %	11,3	12,7
Индекс вязкости	86	83

Депарафинизация вакуумных газойлей (350-500 °С) нефтей Кумколь, Кенкияк (табл. 1) дает депарафинизированные масла со средними значениями индекса вязкости 83-86.

Табл. 2. Выходы продуктов депарафинизации, характеристика и групповой химический состав масел, выделенных из вакуумных газойлей, выкипающих в пределах 370-450 °С

Показатели	Вакуумный газойль нефти Кумколь	Вакуумный газойль нефти Кенкияк
Выходы, %		
депарафинизированного масла	68,6	63,2
гача	31,4	36,8
Качественная характеристика масел		
плотность при 20°C, кг/м ³	897,1	893,8
содержание серы, %	0,14	0,53
вязкость, сСт		
при 100°C	5,16	4,70
при 40°C	30,50	25,60
индекс вязкости	96	94
температура застывания, °С	-12	-14
Состав, %		
парафино-нафтенy	78,2	76,3
легкие ароматические	8,7	6,6
средние ароматические	5,0	7,9
тяжелые ароматические	4,0	4,8
смолы I	1,9	1,7
смолы II	2,4	2,7
Сумма тяжелых АУ и смол, %	8,3	9,2
Индекс вязкости	96	94

Продукты депарафинизации более узких фракций вакуумных газойлей, полученных из нефтей Кумколь и Кенкияк имеют более высокие значения индекса вязкости (табл. 2).

При сравнении показателей качества депарафинизированных масел, полученных из вакуумных газойлей с пределами кипения 370-450 °С, с аналогичными данными для вакуумных газойлей 350-500 °С (табл. 1 и 2) можно отметить, что качество масел из более узкой фракции сырья заметно лучше, чем для более широкой фракции (величины индексов вязкости возросли на 10-11 пунктов).

Полученные результаты говорят о том, что строгие требования к четкости погоно-разделения, предъявляемые к процессам получения масляных дистиллятов при первичной переработке являются оправданными.

Литература

- [1] Жердева Л.Г. и др. Зависимость технологии производства масел от характера сырья. В кн. «Улучшение качества и совершенствование производства смазочных масел». М.: Гостоптехиздат. 1963.
- [2] Шарапов В.И., Семенидо Е.Г., Щеголев И.В. Химия и технология топлив и масел. 1961. №9. С.32.
- [3] Крейн С.Э., Калайтан Е.Н., Гарзанов Г.Е. «Сужение фракционного состава – важнейший фактор улучшения эксплуатационных свойств маловязких дистиллятных масел», в кн. Труды Всесоюзного совещания по улучшению качества масел. М.: Гостоптехиздат. 1963.
- [4] Креймер М.П. и др. Научн.-техн.сб. Серия «Нефтепереработка и нефтехимия». М.: ЦНИИТЭнефтехим. 1969. №8. С.13.
- [5] Одинцов О.К. и др. «Показатели работы вакуумной части установок АВТ с двухколонной схемой перегонки мазута». Труды ГрозНИИ. Вып.24. С.29.
- [6] H.G. Jarman Petroleum. 1961. Vol.24/ No.3. P.90.
- [7] Ольков П.Л., Ван Лицзюнь. Оценка эффективности селективной очистки масляных дистиллятов. ХТТМ. 2004. №4. С.42.
- [8] Славинский Д.М., Кацнельсон М.М. Химия и технология топлив и масел. 1961. №7. С.7.
- [9] Чуракова С.К., Пилюгин В.В., Богатых К.Ф., Нестеров И.Д. Технология перегонки мазута в перекрестно-точной насадочной вакуумной колонне. Научно- технологическое развитие

- нефтегазового комплекса. Доклады Первых международных научных Надировских чтений. *Атырау*. 2003. С.122-125.
- [10] Чуракова С.К., Езунов И.С., Романов В.П. и др. Оценка эффективности работы перекрестноточной насадки в вакуумной колонны при фракционировании мазута с получением масляных дистиллятов. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 1995. №9. С.13-16.
- [11] Жердева Л.Г. и др. Зависимость технологии производства масел от характера сырья. В кн. «Улучшение качества и совершенствование производства смазочных масел». М.: *Гомотехиздат*. 1963.
- [12] Ларсон С.М., Швадерер У.С. Вязкостно-температурный индекс, IV Международный нефтяной конгресс. 1956. Т. VI. С.195.
- [13] Буканова А.С. Корреляционное уравнение зависимости индекса вязкости масел от содержания ароматических углеводородов и смол. *Вестник НИИ РК*. 2005. № 4. С.136-139.

ТЕРМОСИФОННЫЙ ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА

Фиотович Ю.А., Аллагузина Н.Б.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

E-mail: mfugntu@mail.ru

Предприятия нефтепереработки и нефтехимии являются сложными энергоемкими химико-технологическими системами. В настоящее время происходит недостаточное использование вторичных энергоресурсов на технологических установках, что в свою очередь ведет к полной потере низкопотенциального тепла и снижению тепловой эффективности данных установок [1].

Зачастую товарный продукт выходит с установок с высокой температурой. Для дальнейшей транспортировки и передачи к потребителю его необходимо доохладить. В случае большого перепада температур входа и выхода продукта применяемая на сегодняшний день теплообменная аппаратура (кожухотрубчатые, пластинчатые теплообменники, аппараты воздушного охлаждения) основана на принципе конвективного теплообмена через разделяющую поверхность и является достаточно эффективной.

При необходимости снятия низкопотенциального тепла (когда градиент температур охлаждаемых сред составляет лишь несколько десятков и меньше), их применение является нецелесообразным, в связи с необходимостью значительного увеличения поверхности теплообмена и соответственно металлоемкости аппарата [2].

Таким образом, можно выделить наиболее важные задачи в этой области: необходимость разработки и внедрения нового высокоэффективного теплообменного оборудования, утилизация энергии выходящих с установок потоков, снижение металлоемкости и повышение надежности аппаратуры, а также ее ремонтпригодности [3].

Одним из перспективных теплообменных аппаратов, которые могут использоваться для утилизации низкопотенциального тепла, является теплообменник на базе закрытого двухфазного термосифона (ЗДТ). Конструктивно такой утилизатор выполнен из двух параллельных каналов для горячего и холодного теплоносителя (рис. 1) [4]. Каналы разделены перегородкой, в которой плотно закреплены теплопередающие элементы в виде термосифонов.

Внутри термосифоны частично заполнены промежуточным теплоносителем (чаще вода), с помощью которого теплота в испарительно-конденсационном цикле передается от горячего потока к холодному. Давление во внутренней полости термосифона подбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимые температуры испарения и конденсации теплоносителя [5].

Снаружи и внутри трубы могут быть как гладкими, так и оребренными. Такой теплообменник обладает хорошими теплотехническими и прочностными свойствами, малым гидравлическим сопротивлением по обоим средам, надежен при эксплуатации, коэффициент

теплопередачи на порядок выше, чем у более распространенных аппаратов, а также отсутствует необходимость применения компенсаторов температурного расширения.

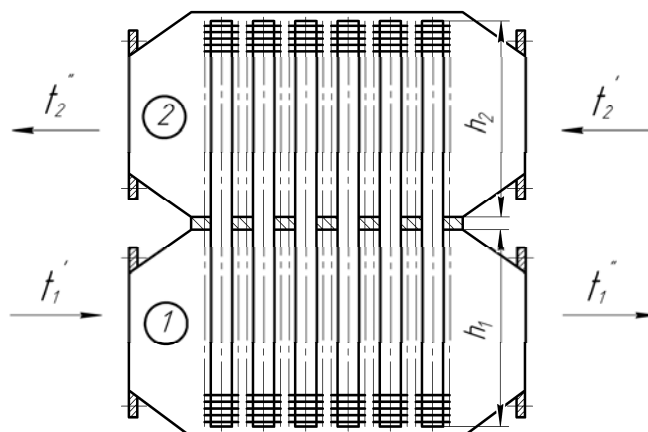


Рис. 1. Схема термосифонного теплообменника-утилизатора

Для подтверждения целесообразности применения аппаратуры на базе ЗДТ в условиях нефтепереработки и нефтехимии был проведен сравнительный теплотехнический расчет двух теплообменников: термосифонного и кожухотрубчатого.

Одной из основных задач при анализе и оценке конструкций теплообменных аппаратов считается определение их теплотехнической характеристики, тепловой эффективности.

В качестве исходных данных задаются: греющий и нагреваемый поток, их физические и теплотехнические характеристики, температуры теплоносителей на входе и выходе из аппарата, их расходы, а также форма течения теплоносителей.

Расчет кожухотрубчатого теплообменника производился по типовой методике путем подбора наиболее оптимального аппарата с помощью проверочного и уточненного расчетов [6].

Расчеты теплообменника на базе ЗДТ проводились по методу, разработанному Безродным М.К. [7]. Рассмотрим его более подробно.

Для расчета такого теплообменника необходимо задаться дополнительными исходными данными: род и температура насыщения промежуточного теплоносителя, соотношение испарительной и конденсационной части термосифонных трубок и их диаметр. Выбор оптимального уровня температуры насыщения промежуточного теплоносителя позволяет минимизировать величину поверхности нагрева теплообменника-утилизатора.

При расчете термосифона обычно принимаются следующие допущения [2]:

- процесс парообразования происходит при поверхностном испарении конденсата;
- температура пара одинакова во всех зонах трубы;
- в зоне конденсации происходит процесс пленочной конденсации по Нуссельту;
- влияние парового потока на движение конденсата по стенке термосифона отсутствует;
- режим течения пленки конденсата ламинарный;
- термосифон располагается вертикально.

Как и при расчетах кожухотрубчатых теплообменников вначале определяется количество тепла, отдаваемое горячим потоком, и среднелогарифмическая разность температур. Затем определяются коэффициенты теплоотдачи и необходимая поверхность теплообмена.

Коэффициенты теплоотдачи предлагается рассчитывать в следующей последовательности.

Коэффициент теплоотдачи от горячего потока к наружной поверхности термосифонных труб в испарительной части

$$\alpha_{исп.}^H = \frac{Nu_x \lambda_x}{d_n}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта; λ_x – коэффициент теплопроводности горячего теплоносителя, Вт/(м·К); d_n – наружный диаметр трубки.

Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности термосифонной трубки к промежуточному теплоносителю

$$\alpha_{исп.}^{кип.} = 780 \frac{\lambda^{1,3} \rho^{0,5} \rho_n^{0,06}}{\sigma^{0,5} z^{0,6} \rho_{no}^{0,66} c_p^{0,33} \nu^{0,3}} q^{0,6}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности промежуточного теплоносителя, Вт/(м·К); ρ – плотность жидкой фазы промежуточного теплоносителя, кг/м³; ρ_n – плотность паровой фазы промежуточного теплоносителя, кг/м³; ρ_{no} – плотность паровой фазы промежуточного теплоносителя при атмосферном давлении, кг/м³; σ – поверхностное натяжение промежуточного теплоносителя, Н/м; ν – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с; z – скрытая теплота парообразования промежуточного теплоносителя, кДж/кг; c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость промежуточного теплоносителя, Дж/(кг·К); q – плотность теплового потока, Вт/м².

Коэффициент теплоотдачи при конденсации промежуточного теплоносителя в термосифонных трубках.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации пара внутри вертикально расположенной трубки вполне пригодна теория пленочной конденсации Нуссельта

$$\alpha_{кон.}^{кон.} = 0,943 \left(\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu l_{кон.ч.} (t_{нас} - t_{ст})} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где r – скрытая теплота конденсации промежуточного теплоносителя, кДж/кг; ρ – плотность жидкой пленки промежуточного теплоносителя, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; λ – коэффициент теплопроводности пленки конденсата промежуточного теплоносителя, Вт/(м·К); μ – динамическая вязкость пленки конденсата промежуточного теплоносителя, Па·с; $l_{кон.ч.}$ – высота термосифонных трубок в конденсационной части, м; $t_{нас}$ – температура насыщения промежуточного теплоносителя в зоне конденсации, °С; $t_{ст}$ – температура стенки термосифонной трубки в зоне конденсации, °С.

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности термосифонных трубок к холодному теплоносителю

$$\alpha_{кон.}^H = \frac{Nu_x \lambda_x}{d_n}, \quad (4)$$

где λ_x – коэффициент теплопроводности холодного теплоносителя, Вт/(м·К).

Коэффициент теплопередачи от горячего теплоносителя к холодному находится по уравнению

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{исп.}^H} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{исп.}^{кип.}} + \frac{1}{\alpha_{кон.}^{кон.}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{кон.}^H}}, \quad (5)$$

где $\delta_{ст}$ – толщина стенки термосифона, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала трубок, Вт/м·К.

Расчеты проводились при следующих заданных условиях:

- в качестве горячего теплоносителя было выбрано дизельное топливо (зимнее), холодного – вода;
- температуры входа и выхода греющего потока соответственно – 70 и 35 °С, для нагреваемого потока соответственно – 45 и 28 °С;
- расход дизельного топлива – 7,7 кг/с, воды – 7,12 кг/с;
- форма течения – противоток, скорости горячего и холодного теплоносителей соответственно – 0,56 и 0,1 м/с;
- в качестве промежуточного теплоносителя в термосифоне выбрана смесь воды со спиртом с температурой насыщения, равной 47,2 °С;
- диаметр термосифонных трубок 25 мм, толщина стенок 2,5 мм;
- длина термосифонных трубок равна 1 м и распределена следующим образом: в испарительной части – 0,35 м, в конденсационной части 0,65 м.

Проведенный расчет показал, что применение теплообменников на базе термосифонов является целесообразным. Необходимая поверхность теплообмена для кожухотрубчатого теплообменника составила 77,8 м². Применение замкнутых двухфазных термосифонов позволяет уменьшить необходимую поверхность до 29,4 м², то есть более чем на 62%.

Увеличения коэффициента теплопередачи, и соответственно уменьшения поверхности теплообмена, можно добиться применением оребрения термосифонных трубок с наружной и внутренней стороны, а так же применением пористого покрытия внутренней поверхности стенок термосифона.

Литература

- [1] Пиоро И.П., Антоненко В.А., Пиоро П.С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами. *Киев: Полиграфкнига. 1991.* 245с.
- [2] Амиров Я.С., Бакиев Т.А., Хурматуллин Ф.Х., Бикбулатов М.М., Назаров В.Н. Безопасность жизнедеятельности: Книга 4. ч.1. Идентификация надежности и работоспособности теплообменной аппаратуры. *Уфа: Изд-во УГНТУ. 1998.* 410с.
- [3] Бакиев Т.А. Разработка теплообменных агрегатов на базе термосифонов для производств нефтепереработки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.09. *Уфа: УГНТУ. 2003.*
- [4] Безродный М.К., Хавин С.А. Расчет и оптимизация глубины утилизации теплоты отходящих газов с помощью термосифонных утилизаторов. *Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2008.* №3. С.66-70.
- [5] Безродный М.К., Волков С.С., Мокляк В.Ф. Двухфазные термосифоны в промышленной теплотехнике. *Киев: Вища школа. 1991.*
- [6] Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. *М.: Химия. 1991.*
- [7] Безродный М.К., Волков С.С. Методические указания к дипломному проектированию. Раздел «Расчет термосифонных систем охлаждения высокотемпературных установок». *Киев: ВКИ. 1987.* 32с.

КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОЗАТВОРА В РЕАКТОРЕ ДЛЯ ПАРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО МАТЕРИАЛА

Салдаев В.А., Просвирников Д.Б.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru

На кафедре ПДМ была разработана опытно-промышленная установка для исследования процесса получения технической целлюлозы путем паровзрывной обработки лигноцеллюлозного сырья. Она состоит из парогенератора, реактора, циклона и экстрактора. Процесс работы установки заключается в подаче пара из паро-генератора в реактор, в который

изначально загружают опилки (древесную стружку или тонкую щепу), обработке лигно-целлюлозного материала перегретым паром температурой 200-250 °С и с давлением 17-20 атм в течении 3-5 минут, дальнейшем резким сбросом давления за счет открытия шарового крана высокого давления.

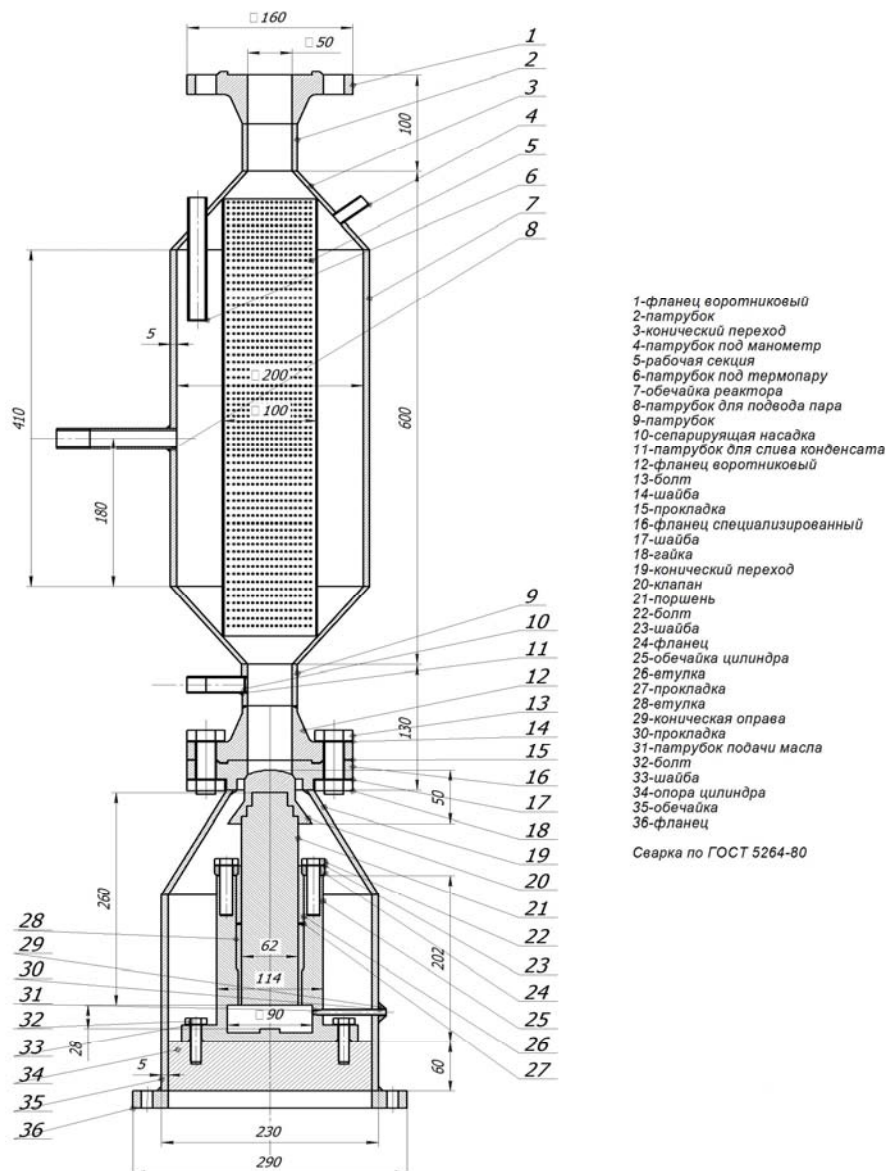


Рис. 1. Конструкция гидрозатвора

Протекающие реакции гидролиза гемицеллюлоз и деструкции лигнина резко прекращаются за счет сброса давления, что приводит к мгновенному вскипанию влаги внутри материала (паровой взрыв), преодолению предела прочности при разрыве поперек волокон и разрыву твердых частиц материала на волокна.

Древесноволокнистая масса, полученная из фракций технологической щепы, не удовлетворяла предъявляемым ей требованиям по дисперсности, так как перепад давления, образующийся при разгерметизации системы, не обеспечивал полного разволокнения материала. Критическое давление, достигаемое в реакторе обуславливалось использованием шарового крана, не позволяющим достичь более высокого перепада давлений, что сказывалось на качестве результирующего продукта.

В результате чего было принято решение модернизировать установку, путем замены шарового крана на сбросной гидравлический клапан высокого давления, позволяющий удерживать давление в реакторе до 50 атм, и обеспечивающий резкую разгерметизацию реактора. Конструкция гидрозатвора в сборе с реактором представлена на рис.1.

Гидрозатвор высокого давления состоит из поршня с клапаном, установленных в цилиндрической обечайке. Подпор поршня обеспечивается подачей масла из гидропресса. Работа лабораторной установки происходит следующим образом: включается гидропресс, и клапан закрывает проход из реактора.

Далее загружается древесная щепка через воротниковый фланец 1, из парогенератора подается пар через патрубок 8, происходит процесс автогидролиза, температура которого регулируется термопарой, установленной в патрубке 6, а давление манометром, установленным в патрубке 4. Давление поршня превышает созданное паром давление в реакторе.

После окончания процесса прогрева древесного материала в течение определенного времени, гидропресс выключается, поршень 21 резко опускается, и в результате разности давлений в реакторе и сбросном клапане, происходит паровой взрыв, приводящий к разделению материала на волокна.

Полученная древесноволокнистая масса после паровзрывной обработки представляет собой компаунд, состоящий из несвязанных между собой растворов сахаров, остаточных нераспавшихся гемицеллюлоз, волокон целлюлозы и низкомолекулярного лигнина, которые легко можно разделить на отдельные компоненты.

Таким образом, применение в установке для паровзрывной обработки лигноцеллюлозного материала гидрозатвора разработанной конструкции, позволяет применять более высокие величины избыточного давления, что обеспечивает качественное диспергирование и разделение на волокна древесных частиц более крупного размера, например технологической щепы. Это также позволяет избавиться от дополнительной стадии предварительного измельчения сырья.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ В АППАРАТЕ ПРОТОЧНОГО ТИПА

Масевич П.В., Натарева О.С., Натарева С.В.

Ивановский государственный химико-технологический университет.

E-mail: natoret@mail.ru

Конвективная сушка является одним из основных технологических процессов химической технологии, на которую затрачивается большое количество энергии. Для поиска оптимальных режимных параметров работы данных сушилок целесообразно применение метода математического моделирования.

Наиболее простая постановка задачи тепломассопереноса в процессе сушки состоит в изучении пространственно-временного изменения содержания влаги и температуры внутри материала. Для упрощения решения вышеуказанной задачи в ряде работ [1, 2] принимается, что коэффициент влагопроводности не зависит от влажности материала, а также пренебрегают термовлагопроводностью.

В этом случае многообразие видов переноса внутренней влаги аппроксимируется уравнением диффузии с эффективным коэффициентом диффузии. Для описания процесса переноса теплоты внутри тела может быть использовано дифференциальное уравнение теплопроводности. Модели такого рода являются неплохим приближением для описания существенных черт процессов тепломассопереноса при сушке влажных материалов.

В реальных условиях в процессе сушки наблюдается изменение влагосодержания и температуры не только влажного материала, но и сушильного агента. В этом случае для решения системы дифференциальных уравнений, описывающей процессы массо- и теплопереноса, может быть использован математический аппарат задачи о поглощении вещества твердым телом из ограниченного объема окружающей среды [3].

На пространственно-временное изменение температуры и влаги внутри твердого тела значительное влияние могут оказывать гидродинамический режим работы аппарата, соот-

ношение количества высушиваемого материала и сушильного агента, расходы твердой и газовой фаз, поступающих в аппарат и удаляемых из аппарата.

С учетом изложенного в работе разработано математическое описание процесса сушки капиллярно-пористого материала в камерной сушилке проточного типа. При постановке задачи было принято, что равновесие между сушильным агентом и влажным материалом описывается нелинейным уравнением изотермы Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ). Периоды прогрева материала и сушилки являются пренебрежимо малыми по сравнению с общей продолжительностью сушки, которая характеризуется периодом постоянной скорости сушки (I период) и периодом падающей скорости сушки (II период).

В первый период сушки вся теплота, подводимое к материалу, затрачивается на интенсивное поверхностное испарение влаги. Период падающей скорости сушки характеризуется замедлением испарения влаги с поверхности материала и его температура постепенно повышается. При достижении влажности материала до равновесной его температура становится равной температуре окружающей среды. Скорость процесса сушки лимитируется как внешней, так и внутренней диффузией.

Сушильный агент нагревается от основного (внешнего) и дополнительного (внутреннего) калориферов. Сушка влажного материала осуществляется с частичной рециркуляцией сушильного агента. С учётом принятых допущений было составлено математическое описание процесса, которое включает следующие уравнения: уравнения диффузии и теплопроводности для твердого материала, уравнение равновесия, уравнения материального и теплового балансов сушилки проточного типа, начальные и граничные условия.

Для решения поставленной задачи был использован интервально-итерационный метод, сущность которого заключается в том, что время всего процесса сушки представляется рядом последовательно соединенных малых временных интервалов. В пределах каждого малого временного интервала сушки процесс описывается системой линейных дифференциальных уравнений.

Уравнение нелинейной изотермы десорбции заменяем уравнением касательной к равновесной кривой. Для каждого небольшого временного интервала осуществляется решение поставленной задачи с помощью метода интегральных преобразований Лапласа. Осуществляя операцию итерации аналитических решений для всех временных интервалов, находят общую картину изменения процесса сушки.

На рисунке приведены в сравнении рассчитанные на ЭВМ и экспериментально найденные кинетические кривые процесса сушки глины.

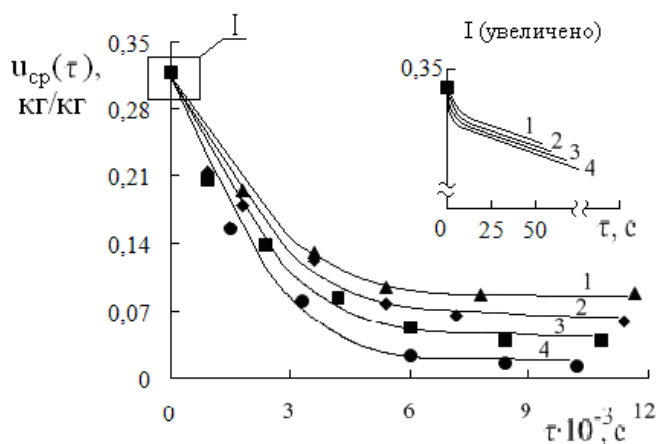


Рисунок. Кривые сушки глины:

линии — расчетные данные,

точки — экспериментальные данные;

температура воздуха, °C: 1 — 90, 2 — 100, 3 — 110, 4 — 120.

Из расчетных кривых, приведенных на рисунке видно, что в начале процесса сушки происходит удаление влаги из материала по некоторому нелинейному закону.

Это связано с принятыми допущениями о том, что периоды прогрева материала и сушилки не учитываются. Для данных условий, когда в начальный момент времени влагосодержание воздуха в сушилке имеет минимальное значение и его температура — максимальное значение, наблюдается интенсивное удаление влаги из материала. Затем в связи с повышением влагосодержания сушильного агента и уменьшением его температуры скорость сушки постепенно замедляется и становится постоянной,

что характерно для первого периода. С наступлением второго периода кривая сушки выражается некоторой кривой линией. При этом влажность материала в конце второго периода асимптотически приближается к равновесному значению.

Удовлетворительное совпадение экспериментальных данных и результатов вычислений позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели реальному процессу.

Проведенные исследования будут способствовать дальнейшему развитию аналитической теории теплопроводности и диффузии в области решения краевых задач нестационарного переноса теплоты и вещества в капиллярно-пористых телах при изменяющихся во времени условиях и более глубокому пониманию сущности протекающих процессов, необходимой для повышения эффективности работы аппаратов.

Литература

- [1] Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. М.: Наука. 1997. 448с.
- [2] Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия. 1987. 208с.
- [3] Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело – жидкость. Львов: Изд-во Львов. ун-та. 1970. 186с.

РАЗРАБОТКА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ИОНИТОВОГО ФИЛЬТРА

Приходько Е.С., Соловьева Е.А., Натарева С.В., Никифорова Т.Е.
Ивановский государственный химико-технологический университет.
E-mail: natoret@mail.ru

Решение проблемы очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых является одной из актуальных задач. Ионы тяжелых металлов, попадая в природные водоемы, приводят к изменениям химического состава воды и её качественных характеристик, которые в основном проявляются в появлении неприятного запаха, привкуса, неестественного цвета и др. В работе проведены исследования процессов ионообменной очистки водных растворов от ионов двухвалентных металлов с помощью природного сорбента, полученного из сердцевин стеблей топинамбура.

Удельная поверхность топинамбура, определенная методом газовой хроматографии по адсорбции азота с помощью прибора Quantochrome NOVA 1200e (США), составила 29,25 мл/г, общий объем пор – $1,49 \cdot 10^{-2}$ см³/г и средний диаметр пор топинамбура – 2,03 нм. На рис. 1 и 2 приведены зависимости распределение пор по размерам в интегральной и дифференциальной форме.

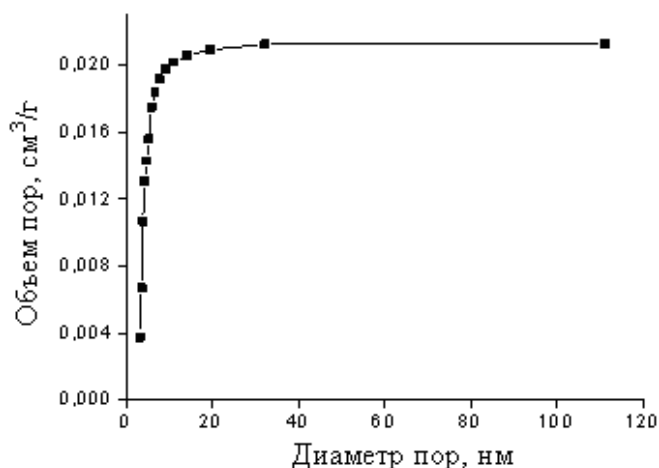


Рис. 1. Интегральная кривая распределения пор по размерам

В результате исследования равновесия процессов ионного обмена в системе водный раствор CuSO_4 – топинамбур установлено, что изотермы ионного обмена удовлетворительно описываются в рамках теории объемного заполнения микропор (ТОЗМ). На основании экспериментальных значений избыточной адсорбции и рассчитанных величин концентраций подвижных ионов в сорбенте были вычислены значения абсолютной адсорбции ионов меди (II). Для исследованных процессов ионного обмена на сильно набухающем целлюлозном сорбенте концентрация подвижных ионов в фазе сорбента при равновесии соизмерима с избыточной адсорбцией. Статическая обменная емкость сорбента составила в среднем 0,6 моль/кг.

В работе также были проведены исследования динамики ионного обмена в горизонтальном аппарате с неподвижным слоем адсорбента.

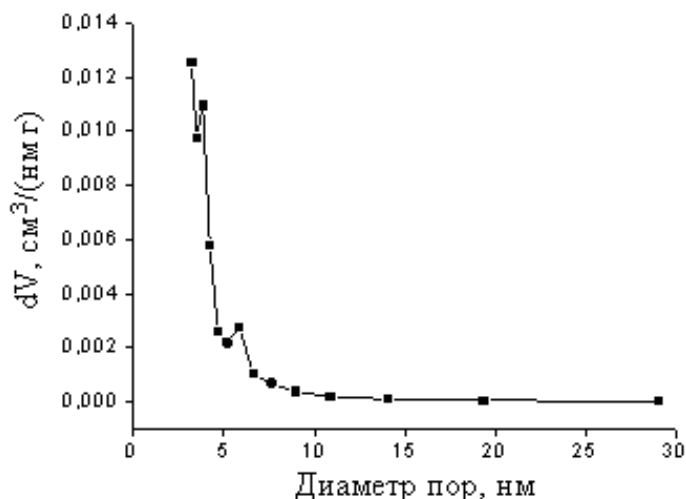


Рис. 2. Дифференциальная кривая распределения пор по размерам

Аппарат был изготовлен из полипропилена и имел следующие основные размеры: диаметр – 100 мм, длина – 260 мм, высота слоя ионита – 35 мм. Производительность аппарат по раствору принималась 33 мл/с. Единовременная загрузка адсорбента в аппарат составляла 0,84 л. Исследования проводили с растворами сульфата меди концентраций от 0,01 до 0,05 н. В качестве примера на рис. 3 показаны выходные кривые ионообменной сорбции ионов Cu(II) на топинамбуре, полученные в горизонтальном аппарате.

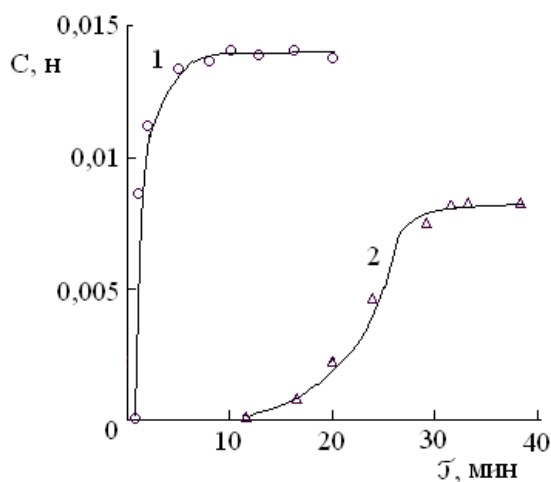


Рис. 3. Выходные кривые сорбции ионов меди (II) на топинамбуре из водных растворов CuSO_4 : $C_{\text{вх}}, \text{н}$: 1 – 0,03; 2 – 0,01.

Проведенные исследования свидетельствуют о достаточно рыхлой и высокопористой структуре адсорбента, обладающим сравнительно высокой обменной емкостью по отношению к ионам двухвалентных металлов. Предложенный целлюлозосодержащий адсорбент рекомендован для проведения процессов очистки металлосодержащих растворов и промышленных сточных вод, т.к. в отличие от традиционных синтетических ионитов он является сравнительно дешевым и простым в получении. Для природных сорбентов разработаны простые, экологически безопасные способы их утилизации, например, внесение отработанных сорбентов в почву и другие.

УСТАНОВКА ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Степанов В.В., Хайруллина Э.Р.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: vlad200719@mail.ru

Как известно, древесина является ценнейшим сырьем, используемым в мебельной, целлюлозно-бумажной, химической промышленности, строительстве, особенно сельском. Но как показывает практика в различных видах деревообработки образуется большое количество мелких древесных отходов, которые практически не находят применения и складываются в отвалы. Такое складирование мелких древесных отходов приводит к засорению больших земельных участков, ухудшает экологическую обстановку.

Лишь не большая часть отходов древесины используются для производства древесностружечных и древесноволокнистых плит и других строительных материалов, а также в целлюлозно-бумажной, гидролизной промышленности.

Использование данных видов сырья для производства теплоизоляционных материалов позволит не только удовлетворить возрастающий спрос на теплоизоляционные материалы, но и частично решить проблему использования вторичных ресурсов, а также улучшить хотя бы частично экологическую обстановку.

Энергосбережение в настоящее время является одним из приоритетных направлений. Требования современной нормативной документации по строительной теплофизике направлены на существенное снижение потерь тепла через ограждения зданий и сооружений. Обеспечение необходимых показателей теплового сопротивления предопределяет широкое использование теплоизоляционных материалов. Причем повышение требований к экологии жилища стимулирует интерес к созданию безопасных теплоизоляционных материалов из сырья растительного происхождения. Данные материалы благодаря своим гигроскопическим свойствам способствуют поддержанию благоприятных температурно-влажностных условий в помещениях.

Перспективным сырьем для производства теплоизоляционных материалов как раз таки являются отходы деревообрабатывающих производств. Использование данных видов сырья для производства теплоизоляционных материалов позволит не только удовлетворить возрастающий спрос на теплоизоляционные материалы, но и частично решить проблему использования вторичных ресурсов.

В связи с этим на кафедре «Переработки древесных материалов» Казанского национального исследовательского технологического университета предлагается установка для переработки древесных отходов с получением теплоизоляционного материала (рисунок).

Установка предназначена для переработки древесных отходов в виде технологической щепы с получением высокоэффективного композиционного материала обладающего высокими теплоизоляционными свойствами.

Установка получения теплоизоляционного материала функционирует следующим образом: древесный наполнитель, в качестве которого берут технологическую щепу,

дозированно поступает из бункера 1, через питатель 2 в смеситель 3. Затем в смеситель 3, при непрерывном смешении, дозированно поступает раствор для обработки древесного заполнителя из емкости 4 через питатель 5, в качестве которого используют раствор стекла натриевого, предназначенный для покрытия частиц заполнителя водонепроницаемой пленкой, препятствующей соприкосновению экстрактивных веществ, содержащихся в древесине, с цементным раствором. Далее в смеситель 3, при непрерывном смешении, дозированно поступает портландцемент, в качестве связующего из бункера 6, через питатель 7. Туда же, в смеситель 3, при непрерывном смешении, дозированно поступает химическая добавка, в качестве которой используется хлорид кальция, необходимый для нейтрализации цементных ядов выделяемых из древесной щепы.

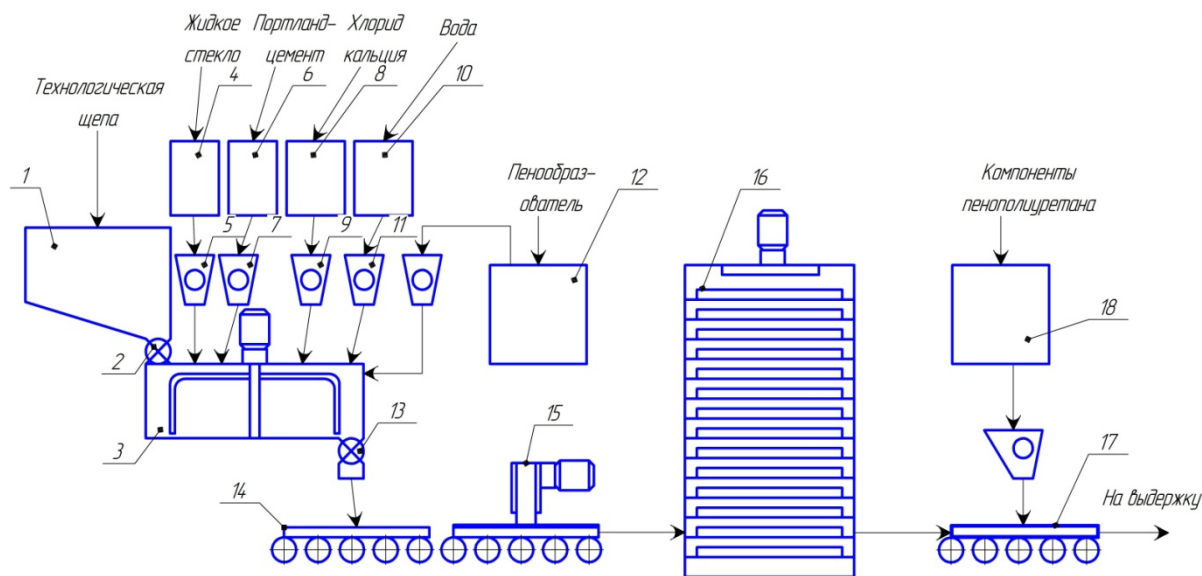


Рисунок. Схема установки получения теплоизоляционного материала: 1 – бункер для щепы; 2 – питатель; 3 – смеситель; 4 – емкость для раствора стекла натриевого; 5 – питатель; 6 – бункер для портландцемента; 7 – питатель; 8 – емкость для хлорида кальция; 9 – питатель; 10 – емкость для воды; 11 – питатель; 12 – пеногенератор; 13 – питатель; 14 – форма; 15 – под прессовочное устройство; 16 – камера гидротизации; 17 – специализированная форма; 18 – заливочная машина.

Хлорид кальция дозированно поступает из емкости 8, через питатель 9. Далее в смеситель 3, при непрерывном смешении, дозированно поступает вода из емкости 10, через питатель 11. В полученную смесь вводят техническую пену из водного раствора пенообразователя дозированно поступающую из пеногенератора 12 и смешивают до получения однообразной массы.

Далее готовая пено-древесно-цементная масса дозированно подается в форму 14, через питатель 13. Наполненная форма 14 поступает в подпрессовочное устройство 15, где ведут формование плитного материала. Отверждение плитного материала осуществляется в камере гидротизации 16. После затвердевания на нее наносят оболочку из пенополиуретана, получаемого путем смешения полиола и полиизоцианата, дозированно поступающих из заливочной машины 18, в специализированную форму 17. Далее материал транспортируют на технологическую выдержку в течение 24 часов.

Средняя плотность теплоизоляционного материала получаемого на данной установки 314 кг/м^3 , средний коэффициент теплопроводности данного материала $0,147 \text{ Вт/(м}^0\text{C)}$, а предел прочности на сжатие $0,39 \text{ МПа}$.

На данной установке можно получить теплоизоляционный материал, обладающий более низкой плотностью, повышенными теплоизоляционными свойствами с сохранением прочностных показателей.

Получаемый теплоизоляционный материал обладает легкостью, прочностью и эффективными теплоизоляционными показателями.

Литература

- [1] Сафин Р.Г. Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств. Казань: из-во КГТУ. 2000. 400с.
- [2] Говоров Г.Г., Ветошкин Ю.И., Корюкова Ю.А. К вопросу об утилизации мелких древесных отходов. Екатеринбург: УГЛТУ.
- [3] Зиатдинов Д.Ф. Заявка на изобретение №2011146569 РФ. Способ получения теплоизоляционного материала; заявитель и патентообладатель Фед. гос. бюдж. образ. учреж. Казан. нац. иссл. техн. ун-ет.; заявл. 28.02.2012.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ФАРМПРЕПАРАТОВ МЕТОДОМ БЫСТРОГО РАСШИРЕНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Илалов Р.Р., Гильмутдинов И.И., Кузнецова А.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: ranis-ramzes1990@mail.ru

Разработка новых технологий микронизации фармацевтических субстанций представляет чрезвычайный интерес для создания специальных высокоэффективных лекарственных форм, контролирующих концентрации фармпрепаратов в организме. Микро и наноформы фармпрепаратов обладают уникальными свойствами и преимуществами, открывающими новые перспективные подходы к терапии самых различных заболеваний. Размер частиц определяет размеры поверхности, которые в свою очередь контролируют скорость растворения и действие лекарства. Традиционные методы диспергирования, такие как механическое воздействие, сушка распылением и выпаривание растворителя, не всегда пригодны при получении очень мелких и свободных от примесей частиц. Методом, позволяющим преодолеть эти недостатки, является метод RESS (быстрое расширение сверхкритических растворов). Этот метод позволяет получать однородные частицы с заданными физико-химическими свойствами и с отсутствием нежелательных примесей [1].

Для проведения опытов диспергирования фармацевтических субстанций на рисунке представлена установка Thar RESS-100 фирмы Thar Technologies Inc. Установка позволяет проводить эксперименты по диспергированию фармацевтических частиц микронных и субмикронных размеров в диапазоне температур 293-393 К при давлениях от 6 до 60 МПа и различной геометрии расширительного устройства.

Перед началом эксперимента производится загрузка исследуемого вещества в насытитель 9, после чего включается термостат 14. Термостат 14 необходим для охлаждения головок насоса 6 и теплообменника 4. Процесс термостатирования продолжается до тех пор, пока температура охлаждающей жидкости не понизится до 268 К.

Режимные параметры процесса (давление в системе, температура электронагревателя, внутренняя и внешняя температура насытителя, температура устройства расширения) задаются и поддерживаются с помощью ПК. Далее открывается вентиль 2 на баллоне 1 и диоксид углерода с первоначальным давлением 5-6 МПа поступает в теплообменник-охладитель 4.

После перехода в жидкую фазу CO₂ через расходомер 5 поступает в насос 6, где сжимается до заданного давления. После прохождения электроподогреваемого теплообменника 8 CO₂ переходит в сверхкритическое состояние и поступает в насытитель 9, где сверхкритический флюид растворяет исследуемое вещество. Встроенная в насытитель мешалка 13 увеличивает скорость процесса растворения.

После насыщения сверхкритического раствора исследуемым веществом (порядка 15 мин) открывается вентиль 10. Из насытителя сверхкритический раствор (диоксид углерода –

исследуемое вещество) поступает в расширительное устройство 11, в котором происходит падение давления. В результате сверхкритический растворитель утрачивает растворяющую способность. Дросселирование происходит в камеру расширения 12 в течение 2 мин, после чего производится отбор пробы.

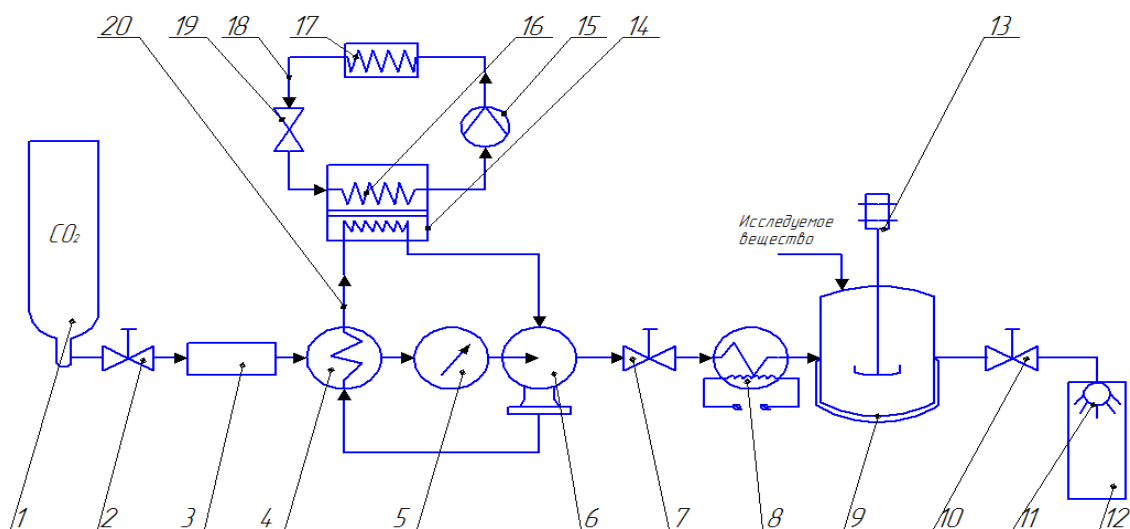


Рисунок. Экспериментальная установка Thar RESS-100-2 Base:

- 1 – баллон с CO₂; 2,7,10 – вентиль; 3 – фильтр-осушитель; 4 – теплообменник-охладитель;
 5 – расходомер; 6 – насос высокого давления; 8 – теплообменник на нагрев (электронагреватель);
 9 – насытитель; 11 – устройство расширения; 12 – камера расширения; 13 – мешалка; 14 – термостат;
 15 – компрессор; 16 – испаритель; 17 – конденсатор; 18 – холодильный цикл в термостате;
 19 – дроссель-вентиль; 20 – охлаждающий цикл (тосол).

Для изучения влияния отношения L/D на размер частиц сконструировано сопловое устройство со съёмными соплами с диаметром от 50 до 150 мкм и длиной 300, 800 мкм. Опыты по диспергированию проводились над лекарствами метилпарабен и ибупрофен с соплами различной геометрии, с отношением длины сопла на диаметр отверстия сопла (L/D): 200/150; 300/50; 300/80; 800/80 мкм.

Для каждой геометрии устройства расширения опыты проведены на всём исследованном интервале температур и давлений: температура насытителя от 40 до 90 °С, температура устройства расширения от 60 до 110 °С, давление от 15 до 35 МПа. Был проведён сравнительный анализ влияния параметров процесса на размер получаемых частиц ибупрофена и метилпарабена.

Увеличение давления системы приводит к уменьшению размера частиц метилпарабена. Результаты измельчения ибупрофена показали противоположные зависимости [2]. Увеличение температуры насытителя и устройства расширения приводит к уменьшению размера частиц метилпарабена и ибупрофена.

Литература

- [1] Кузнецова И.В., Гильмутдинов И.М., Мухамадиев А.А., Гумеров Ф.М., Сабирзянов А.Н. Диспергирование метилпарабена методом быстрого расширения сверхкритического раствора. Казань: Вестник Казанского государственного технического университета им. Туполева А. Н. 2011. №2. С.104-108.
- [2] Кузнецова И.В., Илалов Р.Р., Гильмутдинов И.И., Гильмутдинов И.М., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н. Диспергирование ибупрофена методом быстрого расширения сверхкритического раствора. Казань: Вестник Казанского технологического университета. 2011. №3. С.38-43.

**ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА
ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОАО «КАЗАНЬОРГСИНТЕЗ»**

Абрамова Е.М., Максудов Р.Н.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: maxudov@kstu.ru

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) – неполярный синтетический полимер класса полиолефинов, представляющий собой твердое белое вещество с сероватым оттенком. ПЭВД получается полимеризацией этилена, осуществляемой в трубчатом реакторе при давлениях до 290 МПа и температурах до 295 °С с добавлением кислорода в качестве инициатора. Регулирование свойств получаемого ПЭВД производится изменением технологических параметров и введением пропана в качестве модификатора.

Анализ схемы производства ПЭВД выявил возможность ее модернизации, которая заключается в увеличении реакционного объема и увеличении объемной подачи реагентов в зону полимеризации.

Увеличение подачи обеспечивается заменой существующих турбокомпрессоров на более производительные.

Модернизация схемы производства позволяет уменьшить расход пропана с 4.6 до 2.0 кг на 1 тонну продукта. Замена аппаратов (ректора и компрессоров) на более производительные приводит, несмотря на дополнительные энергозатраты, к увеличению выхода товарного продукта с 7780 кг/ч до 8506 кг/ч и, как следствие, к увеличению годового производства полиэтилена на 17.6 тысяч тонн.

Производство ПЭВД сопровождается большим количеством ВЭР в виде пара, которые до модернизации можно было классифицировать как потери. Предложено использовать эти ВЭР в качестве теплоносителя, подаваемого в контуры технологических аппаратов цехов 93 - 99, и для отопления их помещений.

**ПРОЦЕСС ГАЗИФИКАЦИИ КАК ЭТАП
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОТОРНОГО ТОПЛИВА**

Хисамеева А.Р., Галеев Т.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: albinakhisameeva@mail.ru

Обеспечение потребителей бытовым топливом, получаемым из древесины путем экологически чистой переработки и полной утилизации отходов лесозаготовок и деревообрабатывающих производств, может быть достигнуто с помощью реконструкции существующих энергетических объектов с использованием разработки новых технологий.

Предлагаемая технология базируется на предварительной подготовке древесного сырья (технологическая щепа), последующей его 100-процентной газификации в прямоточном газогенераторе, получением метанола для дальнейшей переработки в моторное топливо.

Реализация данной технологии позволит конкретному предприятию избежать столь острой проблемы снабжения моторным топливом, а также постепенно ликвидировать запасы неиспользуемых, зачастую портящихся, древесных отходов путем их экологически чистой переработки и полной термической утилизации.

Группой специалистов-сотрудников университета усовершенствована технология газификации твердых отходов, в частности отходов деревообрабатывающих производств, с последующим каталитическим превращением полученного синтез-газа в моторное топливо из метанола [1].

На рисунке представлено оборудование, участвующее в технологическом процессе получения метанола из синтез-газа.

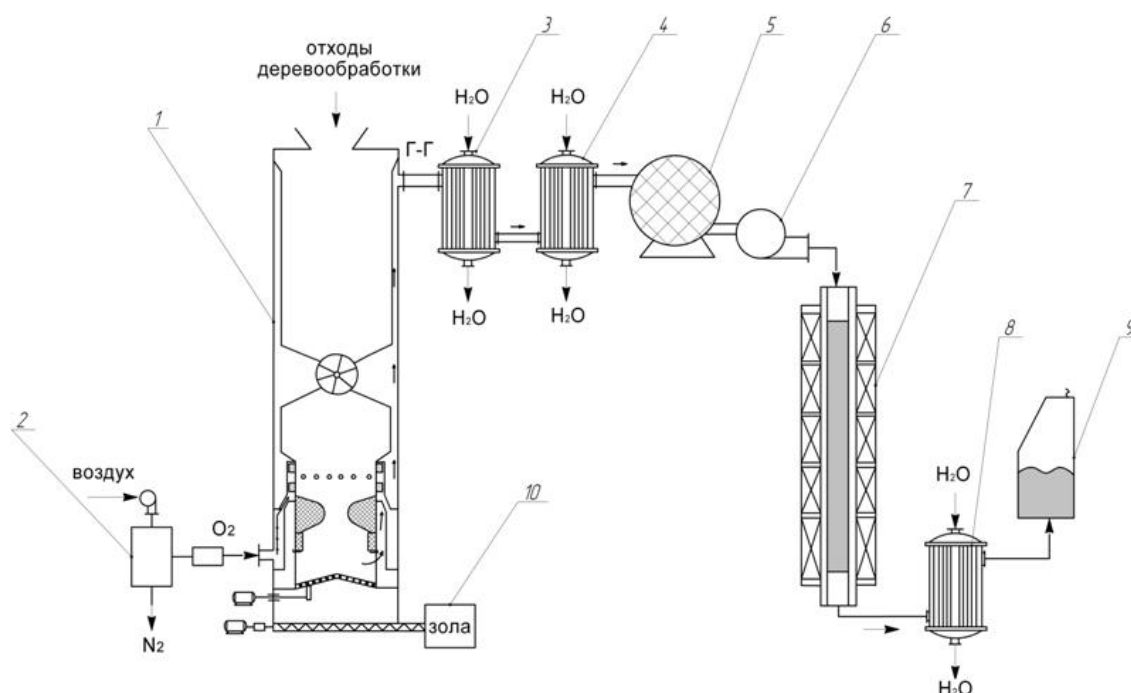


Рисунок. Технологическая схема получения метанола из синтез-газа: 1 – газогенератор; 2 – сепаратор; 3, 4, 8 – рекуперативный теплообменник; 5 – газгольдер; 6 – компрессор; 7 – реактор синтеза метанола; 9 – накопитель.

Для осуществления процесса прямоточной газификации в качестве газифицирующего агента используют воздух, обогащенный кислородом, подаваемый газодувкой через сепаратор воздуха (обоганитель воздуха кислородом) 2.

Полученный на выходе газ, имеющий температуру 800 °С, поступает поочередно в теплообменники 3 и 4, где охлаждается до температуры 320-350 °С. Так как процесс газификации в газогенераторе 1 проходит при атмосферном давлении, то скорость движения газа очень мала. Для эффективной работы компрессора генераторный газ накапливают в газгольдере 5 до необходимого объема и затем компримируют до давления 4,5÷5 МПа, и направляют в реактор синтеза метанола 7, где на катализаторе, содержащий оксид меди, оксид цинка, оксид алюминия, происходит превращение его в метанол. Перегрев реактора контролируют датчиками температуры.

Смесь газообразных продуктов на выходе охлаждается в теплообменнике 8 и поступает в накопительный бачок 9.

Зола из газогенератора попадает в зольник 10. Удаление золы осуществляют с помощью шнекового питателя в нижней части газогенератора.

Соблюдение данной технологии позволит получать метанол в процессе безотходного производства при использовании одного легкодоступного катализатора.

Затем метанол поступает в реактор термического катализа, предназначенный для получения углеводородных фракций моторного топлива.

Применение газификации древесины в энергетических целях позволяет решить несколько задач, главными из которых являются:

- получение экологически чистого энергетического топлива – газа, сжигание которого практически исключает загрязнение атмосферы вредными выбросами;
- отсутствие необходимости в очистке дымовых газов перед их выбросами в атмосферу;
- получение водорода, метанола и других продуктов для химической промышленности;
- обеспечение, в определенной степени, топливно-энергетической независимости малых предприятий.

Благодарности

Данная работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013” по теме: “Создание технологии и опытной установки комплексной переработки отходов лесной промышленности с получением теплоизоляционного материала”, при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

- [1] Сафин Р.Р., Сафин Р.Г. Анализ современного состояния лесопромышленного комплекса и перспективы его развития на базе кафедр лесотехнического профиля КГТУ. *Вестн. Казанского технологического ун-та*. 2010. № 4. С.120-130.

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КЛАПАНА В КУЛАЧКОВО-ЗУБЧАТОМ ВАКУУМНОМ НАСОСЕ

Сагитов А.Р., Райков А.А., Бурмистров А.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: AlbertNaz.55@mail.ru

В настоящее время все большую роль в высокотехнологичных процессах, таких как нанoeлектроника, наноинженерия, медицина, пищевая промышленность, металлургия, нефтехимическое производство, атомная энергетика, энергосберегающие технологии начинает играть чистота создаваемого вакуума. Одним из вакуумных насосов, позволяющих обеспечить такую откачку, является кулачково-зубчатый вакуумный насос (КЗВН).

Конструктивно КЗВН представляет собой бесконтактный насос объемного принципа действия, в котором перемещение газа осуществляется за счет периодического изменения объема замкнутой полости, образующейся между зубьями роторов, торцевыми крышками и расточкой корпуса. Всасывание и выхлоп газа осуществляется через окна, расположенные в торцевых крышках. Открытие и закрытие окон осуществляется самими роторами и не зависит от давления в рабочей полости.

Это определяет основные недостатки данного насоса: пережатие газа в рабочей полости при входных давлениях, близких к атмосферному, и недожатие в области давлений, близких к остаточному. Недожатие приводит к повышению обратного потока газа из атмосферы в рабочую полость насоса, а также увеличивает потребляемую мощность.

Это иллюстрирует рис. 1, на котором изображены расчетные диаграммы индикаторной мощности. При высоких давлениях на входе основные затраты мощности связаны с процессом сжатия (0,5-3 рад), однако при низких входных давлениях наблюдается рост индикаторной мощности при углах 3-4 рад в момент открытия окна нагнетания. В результате при низких входных давлениях, несмотря на снижение массы откачиваемого газа, снижения потребляемой мощности не происходит (рис. 2).

Одним из конструктивных решений, позволяющих снизить энергетические затраты, является установка клапана на выход из насоса. Он позволяет уменьшить перетекания газа с выхода в рабочую полость, исключить явление недожатия и тем самым, улучшить характеристики в области низких давлений. Однако, установка клапана на выход насоса имеет свои недостатки: увеличивается сопротивление окна нагнетания, что снижает быстроту действия насоса в целом. Также усложняется конструкция насоса и ухудшается его надежность.

В работе [1] для численного анализа рабочего процесса КЗВН была разработана математическая модель в основе которой лежат уравнения энергетического баланса термодинамической системы переменной массы. Адекватность данной модели была подтверждена

сравнением с экспериментом [2]. Именно с использованием данной математической модели были построены графики на рис. 1, 2.

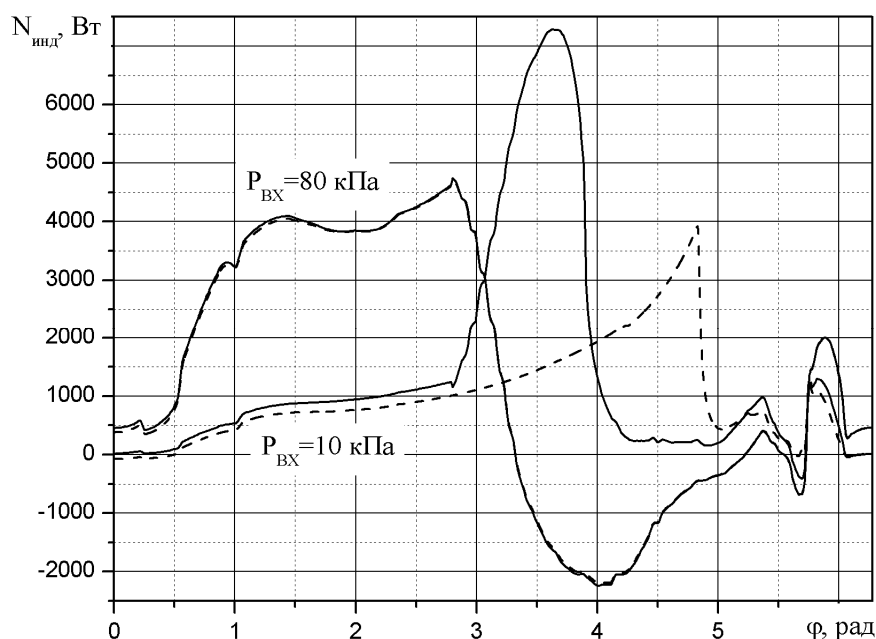


Рис.1. Диаграмма индикаторной мощности ($n=3000$ об/мин):
сплошная линия – до установки клапана, пунктир – после установки клапана

Для учета влияния выходного клапана в математическую модель было введено условие отсутствия потока газа с выхода в рабочую полость. Данное условие не учитывает увеличение газодинамического сопротивления выходного тракта и усилие, требуемое для срабатывания клапана. Тем не менее, оно позволяет оценить целесообразность установки выходного клапана.

Как видно из рис. 2, установка клапана практически не сказывается на мгновенной индикаторной мощности при высоких давлениях, однако при давлениях, близких к остаточному, пиковая мощность снижается на 45%.

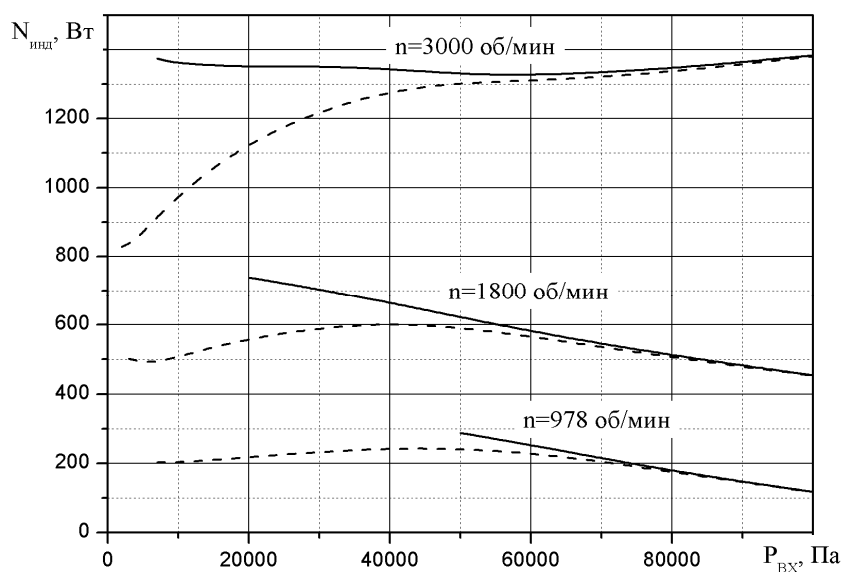


Рис. 2. Зависимости индикаторной мощности от давления на входе в насос:
сплошная линия – исходная конструкция, пунктир – после установки клапана

Зависимость мощности от входного давления, изображенная на рис. 2 показывает снижение индикаторной мощности на остаточном давлении на 34%. В то же время при давлениях 60-100 кПа установка клапана практически не сказывается на энергозатратах.

Таким образом, проведенные расчеты показывают улучшение энергетических показателей при установке выходного клапана в области низких давлений. Для снижения отрицательных воздействий клапана вследствие увеличения газодинамических сопротивлений в нагнетательном тракте рекомендуется его опциональная установка на насосы, предназначенные для поддержания вакуума при давлениях ниже 40 кПа.

Литература

- [1] Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. Математическая модель кулачково-зубчатого вакуумного насоса. Индикаторные диаграммы. *Вакуумная техника и технология*. 2011. Т.21. №4. С.213-220.
- [2] Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. Экспериментально-теоретическое исследование индикаторных диаграмм кулачково-зубчатого вакуумного насоса. *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. №15. С. 210-214.

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЩЕЛЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ

Булкин В.А., Салеев А.Р., Якупов Р.Р.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp_kstu@mail.ru

Истечение жидкостей из круглых отверстий и насадок в процессах и аппаратах химической технологии рассмотрено достаточно широко, но недостаточная изученность теории истечения жидкостей из отверстий прямоугольного сечения сдерживает расчет и развитие проектирования гидродинамических смесителей, для смешивания трудносмешиваемых и несмешивающихся жидкостей, в которых отверстия такого вида используются.

Водосливом принято называть безнапорное отверстие (водосливное отверстие)- вырез, сделанный в гребне стенки, через который протекает жидкость. Часть стенки в пределах водосливного отверстия, через которую переливается жидкость, называется водосливной стенкой. Речные водосливы являются прототипом щелевых отверстий.

Водосливы классифицируются по ряду признаков.

В зависимости от геометрической формы водосливного отверстия. Различают: прямоугольные, треугольные, трапециевидные, круговые, параболические, с наклонным гребнем.

В зависимости от формы и размеров поперечного сечения водосливной стенки различают:

- водосливы с тонкой стенкой; в случае этих водосливов, струя воды переливающаяся через водосливную стенку, формируется под действием только верховой ее грани; остальные поверхности водосливной стенки не влияют на картину истечения; при наличии вертикальной стенки, водослив с тонкой стенкой имеет место, когда $\delta \leq (0.1-0.5)H$;
- водосливы с широким порогом, имеющие водосливную стенку любой высоты, гребень которой обычно представляет собой горизонтальную плоскость. В случае прямоугольных водосливов с широким порогом, толщина стенки лежит в пределах $2H \leq \delta \leq 8H$.
- водосливы со стенкой практического профиля.

В зависимости от очертания гребня водосливной стенки в плане. Различают водосливы с прямолинейным в плане гребнем: прямые (лобовые), косые, боковые.

В зависимости от влияния нижнего бьефа на истечение. Различают неподтопленные водосливы (Q и H не зависят от глубины h_n в нижнем бьефе), и подтопленные водосливы (Q и H зависят от глубины h_n в нижнем бьефе).

В зависимости от соотношения b и B_0 (относится лишь к прямоугольным водосливам):

- водосливы без бокового сжатия, когда $b = B_0$,
- водосливы с боковым сжатием, когда $b < B_0$

В зависимости от наклона водосливной стенки:

- водосливы с вертикальной стенкой;
- водосливы с наклонной стенкой;

В зависимости от степени свободы доступа воздуха под струю жидкости, переели-вающуюся через водосливную стенку:

- водосливы со свободным истечением, со свободным доступом воздуха с боков в пространство под струю (или воды нижнего бьефа, в случае, если, уровень воды нижнего бьефа стоит выше гребня водослива)
- водослив с несвободным истечением, когда в подструйное пространство доступ воздуха (или воды нижнего бьефа) затруднен.

В данной работе предпринята попытка исследования вертикального водослива подтопленного и неподтопленного типа, для которых ширина отверстия на порядок меньше высоты.

Для исследования разработана лабораторная установка, представляющая собой емкость-реактор, из которого производится непосредственно истечение (процесс смешивания); щелевая насадка, с заданными размерами установлена на стенке реактора, для изучения определенного вида истечения или смешивания жидкостей; насосом осуществляется подача воды и создается требуемых расход. Кроме того, к установке подведена линия слива, для создания и поддержания необходимого уровня жидкости.

В процессе истечения жидкости в данной установке, отверстие предполагается малым, по сравнению с напором H и размерами резервуара и свободная поверхность жидкости не влияют на приток струи жидкости к отверстию, т.е. наблюдается совершенное сжатие струи.

Степень сжатия оценивается коэффициентом сжатия ε , равным отношению площади поперечного сечения струи в месте сжатия к площади отверстия:

$$\varepsilon = w_c / w. \quad (1)$$

После преобразований находим:

$$v = \varphi \sqrt{2gH_0}, \quad (2)$$

где φ – коэффициент скорости (для отверстия в тонкой стенке $\varphi = 0,97$)

Обычно площадь реактора намного больше площади отверстия, поэтому скорость V_0 практически незначительна и ею можно пренебречь, тогда формула примет простой вид:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}. \quad (3)$$

Распределение скоростей по сечению струи является равномерным лишь в средней части сечения (в ядре струи), наружный же слой жидкости несколько заторможен вследствие трения о стенку. Как показывают опыты, скорость в ядре струи практически равна теоретической, поэтому введенный коэффициент φ следует рассматривать как коэффициент средней скорости. Если истечение происходит в атмосферу, то давление по всему сечению цилиндрической струи равно атмосферному.

Расход жидкости в сжатом сечении можно определить из уравнения неразрывности:

$$Q = w_{сж} v \quad (4)$$

Практически удобнее пользоваться вместо $w_{сж}$ произведение $w\varepsilon$ где ε коэффициент сжатия для малых отверстий, равный 0,6-0,64), таким образом, можно записать:

$$Q = \epsilon \phi w \sqrt{2gH} \quad (5)$$

Произведение ϵ на ϕ принято обозначать буквой μ и называть коэффициентом расхода, подставив $\mu = \epsilon \phi$ получим формулу для расчета расхода жидкости при истечении ее в атмосферу через отверстия и насадки:

$$Q = \mu w \sqrt{2gH} = \mu w \sqrt{2gp / \gamma}, \quad (6)$$

где p – расчетное давление, под действием которого происходит истечение жидкости.

На основе опытов установлено, что для малого отверстия в тонкой стенке μ колеблется от 0,59 до 0,63, или в среднем $\mu = 0,61$. Это выражение применимо для всех случаев истечения, трудность заключается в достаточно точной оценке коэффициента расхода μ . Из уравнения следует, что:

$$\mu = Q / (w \sqrt{2gH}) = Q / Q_m. \quad (7)$$

Это значит, что коэффициент расхода также представляет собой отношение действительного расхода к теоретическому, который имел бы место при отсутствии сжатия струи и сопротивления, но теоретический расход не является расходом при истечении идеальной жидкости, так как, сжатие струи будет иметь место и при отсутствии гидравлических потерь.

Т.о. действительный расход всегда меньше теоретического, следовательно, коэффициент расхода всегда меньше 1 вследствие влияния двух факторов: сжатия струи и сопротивления. В одних случаях больше влияет первый фактор, в других – второй.

При истечении жидкостей через затопленные отверстия, вся кинетическая энергия струи теряется на вихреобразование, как при внезапном расширении. Для затопленного отверстия формулы для определения скорости и расхода имеют тот же вид, что и для незатопленного отверстия. Разница заключается в том, что под величиной подразумевается в случае затопленного отверстия не глубина погружения, а разность уровней в резервуарах:

$$Q = \mu_{\text{нес}} \omega \sqrt{2g\Delta H_o}, \quad (8)$$

где $\mu_{\text{нес}}$ – коэффициент расхода затопленного отверстия, определяемый по формуле А.Д. Альштуля:

$$\mu_{\text{нес}} = \epsilon / \mu_3 = \epsilon / \sqrt{(2\epsilon^2 m^2 - \epsilon^2 n^2 + \xi + 1 - 2\epsilon m)}, \quad (9)$$

где $n = \omega / \Omega$ отношение площади отверстия к площади сечения потока выше отверстия, $m = \omega / \Omega_2$ то же ниже отверстия.

Для отверстий малых размеров по сравнению с резервуарами ($n \rightarrow 0$, $m \rightarrow 0$):

$$\mu_3 = \epsilon / \sqrt{2g\Delta H_o}, \quad (10)$$

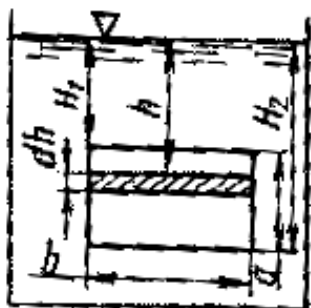


Рис. 1а. Истечение жидкости через прямоугольные отверстия

т.е. совпадает со значением коэффициента расхода при незатопленном истечении (истечении в атмосферу).

Коэффициент сжатия струи ϵ и коэффициент сопротивления ξ при истечении при затопленном отверстии практически не отличается от соответствующих коэффициентов при истечении через незатопленное отверстие.

Опыт показывает, что коэффициент расхода μ при истечении через затопленное отверстие можно принимать равным коэффициенту μ для незатопленного отверстия.

На изображенной схеме, рис. 1, истечение происходит следующим образом: вода, скопившись перед стенкой водослива, переливается через щель, сделанную в стенке водослива.

Верхним бьефом называется область потока перед водосливной стенкой, нижним бьефом называется область потока за водосливной стенкой.

Сечение В-В-сечение на расстоянии l_v , в котором начинается заметный спад свободной поверхности. Как правило, $l_v = (3-5)H$.

Величина H , измеряемая в сечении В-В, называется геометрическим напором на водосливе. Геометрический напор на водосливе представляет собой превышение над гребнем водосливной стенки горизонта воды в сечении В-В, где еще нет заметного спада свободной поверхности, обусловленного истечением воды через водослив.

В данной работе рассматривается прямоугольный водослив, с вертикальной тонкой стенкой. Рассматриваются подтопленные и неподтопленные водосливы с боковым сжатием.

Назначением данной лабораторной установки является изучение процессов истечения жидкостей из щелевых насадок, водосливов, а так же для изучения процессов смешивания не смешивающихся или трудносмешиваемых жидкостей.

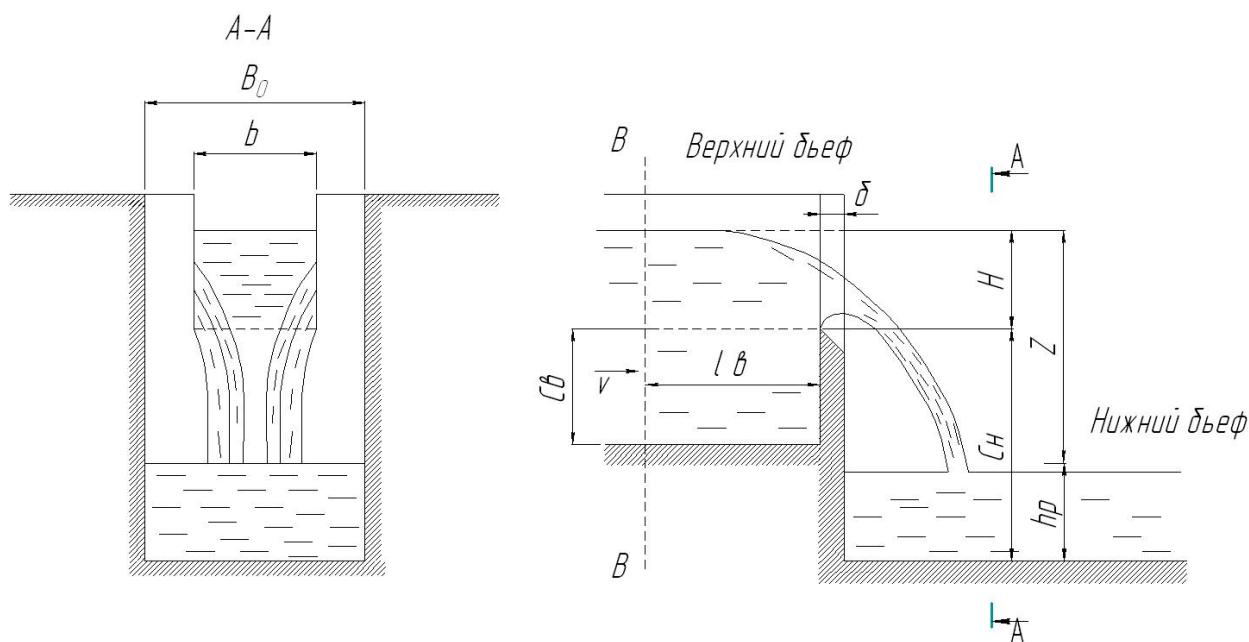


Рис.16. b – ширина водосливного отверстия; δ – толщина водосливной стенки; C_v , C_n – высоты водосливной стенки в верхнем и нижнем бьефах; B_0 – ширина русла, в котором установлен водослив; Z – геометрический перепад на водосливе (разность горизонтов воды в верхнем и нижнем бьефах); v – скорость подхода, средняя скорость, измеряемая в указанном выше сечении В-В.

Главным условием при проектировании установки для изучения истечения жидкостей из насадок, являлось создание и учет условий подтопления, влияния порога водослива, необходимого вертикального и бокового сжатия, совершенного сжатия струи, т.е. исключения влияния боковых стенок и дна резервуара на процесс истечения жидкости из затопленного и незатопленного щелевого отверстия.

При исследовании истечения жидкостей, одним из исследуемых параметров является анализ и изучение вида насадки, ее геометрии и расположение, определение коэффициента расхода, зависящего напрямую от геометрического напора (расхода подаваемой жидкости, относительного перепада бьефов), параметров и типа насадки (коэффициентов сжатия).

Установка состоит из емкости-реактора, из которой производится непосредственно истечение (процесс смешивания), щелевой насадки, с заданными размерами, для изучения определенного вида истечения или смешивания жидкостей, емкостей из которых происходит подача жидкостей для смешивания, и насоса для подачи воды и осуществления процесса циркуляционного перемешивания. Кроме того, к установке подведены линия подачи воды и линия слива, для создания и поддержания необходимого уровня жидкости.

Так же на линиях установлены регулирующие вентили для осуществления общей функциональности лабораторной установки и регуляции расхода компонентов при изучении процессов смешивания.

Достижение условий подтопления и неподтопления при исследовании достигалось изменением вариантов компоновки подачи жидкости в емкость-реактор. Для определения коэффициента расхода производится исследование истечения при различных величинах геометрического напора на водосливе и расходах воды. Кроме того, при данном исследовании производится анализ вида истекающей струи и величина ее вылета, как факторов способных оказывать влияние на процесс истечения жидкости.

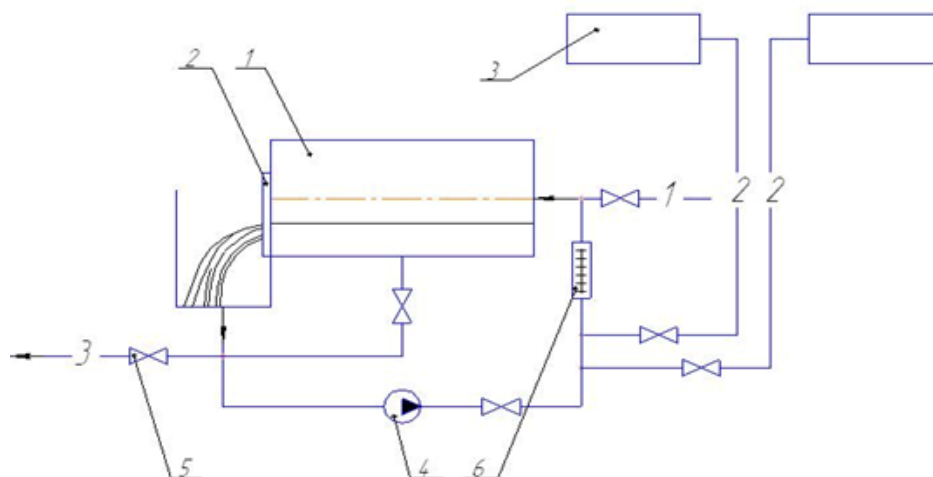


Рис. 2. 1 – емкость-реактор, 2 – насадка щелевая, 3 – резервуар для хранения и подачи жидкостей для смешивания, 4 – насос на линии нагнетения, 5 – регулирующие вентили, 6 – ротаметр. -1- – линия подачи воды. -2- – линия подачи жидкостей смешивания. -3- – линия слива.

На рис. 2 изображена схема изучения истечения жидкостей через неподтопленный водослив щелевого типа.

В реактор 1 производится подача воды, по линии -1- до определенного уровня, из которого через насадку 2 происходит истечение жидкости. Вода циркулирует в установке по замкнутому контуру при помощи насоса 4. Измерение расхода производится при помощи ротаметра 6, регулирование осуществляется вентилем, находящимся на линии нагнетения.

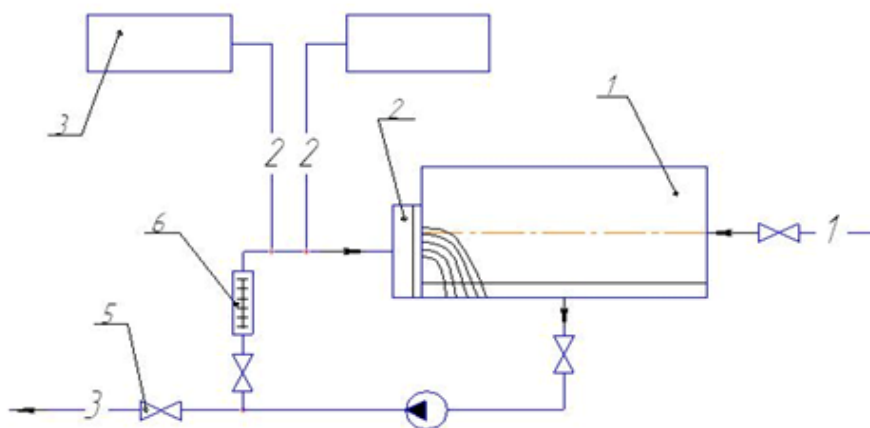


Рис. 3. 1 – емкость-реактор, 2 – насадка щелевая, 3 – резервуар для хранения и подачи жидкостей для смешивания, 4 – насос на линии нагнетения, 5 – регулирующие вентили, 6 – ротаметр. -1- – линия подачи воды. -2- – линия подачи жидкостей смешивания. -3- – линия слива.

Слив жидкости из установки осуществляется по линии слива -3-.

При использовании установки по рис. 2 вентиль на линии нагнетения воды в реактор, при работе насоса всегда должен быть открыт.

При исследовании истечения жидкостей через подтопленный водослив щелевого типа, установка выглядит соответственно рис. 3.

На насадку монтируется корпус, к которому монтируется рукава подачи воды. В корпусе выполнена полость для создания верхнего бьефа и геометрического напора. В емкость-реактор производится заполнение воды по линии -1- до необходимого уровня для создания подтопления, циркуляция воды осуществляется по замкнутой схеме.

Слив жидкости из установки осуществляется по линии слива -3-. Следует отметить, что при работе насоса вентили на линии слива или на линии подачи жидкости в емкость-реактор должны быть открыты. Так же должен быть открыт вентиль на линии слива и емкости-реактора.

Достоинством установки является возможность имитации работы смесительных устройств в аппаратах типа «Смекон» [6, 7], применяющихся для получения эмульсий и суспензий из трудно смешивающихся компонентов.

Литература

- [1] Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. -4е изд., доп. и перераб. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние. 1982. 672с.
- [2] Касаткин Г.К. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: «Химия». 1973. 754с.
- [3] Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: «Химия». 1981.
- [4] Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник. Л.: Стройиздат. Ленингр. Отд-ние. 1986. 440с.
- [5] Альштуля А.Д. Примеры расчета по гидравлике. Учеб. Пособие для вузов. М.: Стройиздат. 1976. 255с.
- [6] Смирнов С.А., Реут В.И., Егоров А.Г., Булкин В.А. Коэффициент расхода при истечении идеальной жидкости из вертикального щелевого отверстия. Тепло- и массообменные процессы, энергетика. Вестник КГТУ. 1998. №2.
- [7] Смирнов С.А., Реут В.И., Яшин Ю.Н., Булкин В.А. Расчет и проектирование щелевого смесителя для гомогенизации ингибиторных растворов. Нефтяное хозяйство. 1999. №1.

СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ЭКСТРАКЦИЯ В ПИЛОТНОЙ ПОЛУПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОТОЧНОЙ УСТАНОВКЕ

Гиззатов Р.И., Максудов Р.Н.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Разработана полупромышленная сверхкритическая экстракционная установка для твердых и жидких материалов, работающая при температурах от 308 до 333 К при давлениях до 35 МПа. Спроектирован и изготовлен экстрактор с рабочим объемом 800 мл. Проведены пробные измерения выхода экстракта из растительных клеточных структур и получены кривые выхода экстракта в зависимости от температуры, давления и продолжительности процесса. Осуществлено математическое моделирование процесса для полидисперсного слоя обрабатываемого материала.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОВОДИМОСТИ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ

Галимов Ф. Ф., Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: fayel@bk.ru

Возможность аналитического определения перетеканий газа очень важна на стадии проектирования вакуумных систем и насосов в частности.

В данной работе рассматриваются методы расчета перетекания через щелевые каналы роторного механизма бесконтактных вакуумных насосов типа Рутс, КЗВН и спиральных насосов. В данных насосах течение газа происходит через щелевые каналы, образованные цилиндрическими поверхностями (рис. 1).

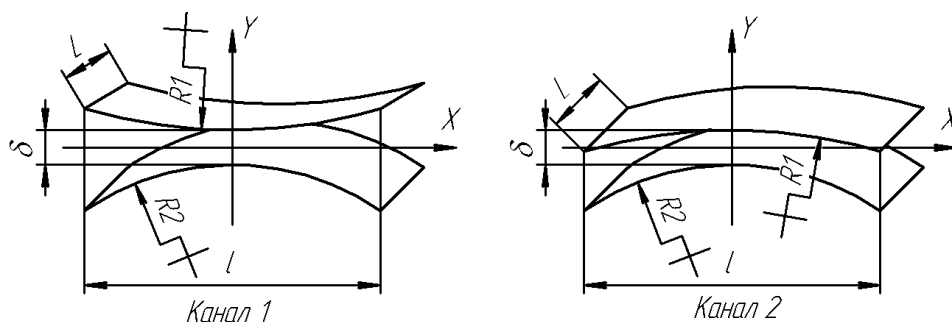


Рис. 1. Основные размеры щелевых каналов

Методы расчёта проводимости для данных каналов, в первую очередь, определяются режимом течения газа. Отметим, что в данной работе рассматривается вязкостный режим течения.

Проводимость канала для малых перепадов давления между выходом и входом вычисляется [1]

$$U = \frac{\sqrt{2}\delta^2 L \sqrt{\frac{\delta}{R_2} \pm \frac{\delta}{R_1} P_{cp}}}{9\pi\eta}, \quad (1)$$

где: R_1 – больший радиус канала; R_2 – меньший радиус канала; δ – минимальное расстояние между стенками канала; L – длина канала, в направлении перпендикулярном плоскости сечения; η – коэффициент динамической вязкости, P_{cp} – среднее давление в канале.

Проводимость для произвольного перепада давлений вычисляется находится в виде [2]

$$U = \frac{\sqrt{2R_g T_1} \xi (1 + \tau) \delta L}{9\pi(1 + \sqrt{1 + \alpha(1 - \tau^2)\xi^2})}, \quad (2)$$

где R_g – газовая постоянная; τ – отношение давлений между выходом и входом в канал; T – температура; α , ξ – коэффициенты, получаемые аппроксимацией экспериментальных данных или данных численного эксперимента.

Еще один подход, основанный на решении дифференциального уравнения массового расхода, представлен в работе [3]. Массовый расход через плоскую щель в дифференциальной форме записывается выражением

$$M = \frac{L h^3}{12 R_\Gamma T \eta} P[X] \frac{dP}{dX} \left(1 - \frac{192 h}{\pi^5 L} \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2j+1)^5} \tanh \frac{(2j+1) \pi L}{2 h} \right) \right), \quad (3)$$

где X – координата в направлении течения газа.

Данное дифференциальное уравнение решается численным методом с использованием подхода LSODA в пакете Mathematica. Начальными условиями являются заданный массовый расход через канал и давление на входе ($P[-l/2]=P_1$) при изменении X в интервале от $-l/2$ до $l/2$. В результате решения дифференциального уравнения находится распределение давления в канале $P=f_1(X)$ (рис. 2), откуда вычисляется величина давления на выходе $P_2=f_1(l/2)$.

Проводимость канала рассчитывается по формуле.

$$U = M \frac{P_1 - P_2}{R_\Gamma T}. \quad (4)$$

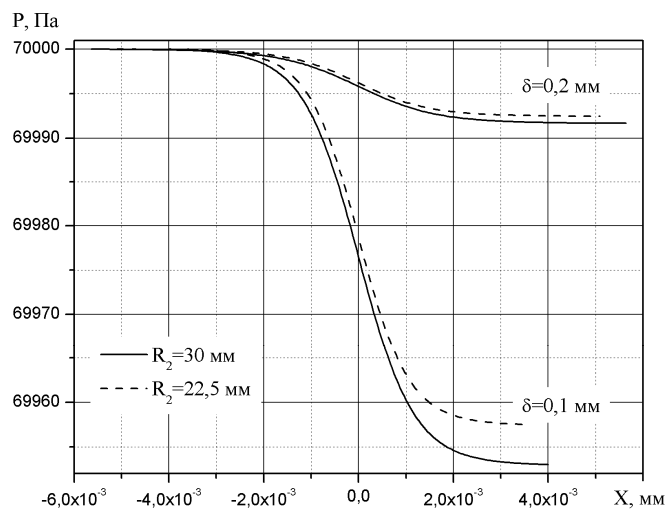


Рис. 2. Распределение давления по длине щели ($R_1=60$ мм, $P_1=70000$ Па, $L=130$ мм)

С использованием выражений (1)-(4) проведен расчёт проводимости каналов 1, 2 при варьировании радиусов, зазора, давления и отношения давлений на входе и выходе из щелевого канала. В сопоставлении с экспериментальными данными, полученными для этих же условий в работе [4], значения проводимости представлены на рис. 3.

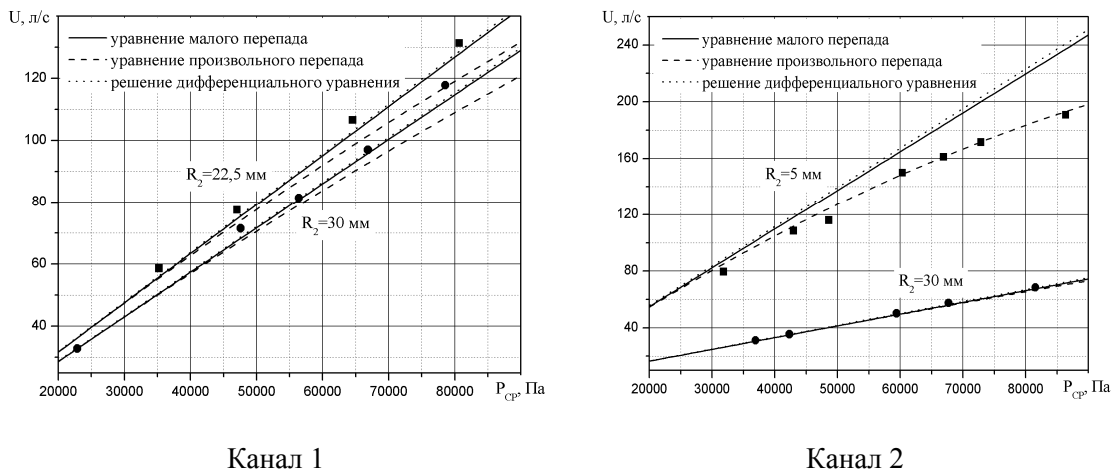


Рис. 3. Графики зависимости проводимости от давления в измерительной камере: линии – расчет, точки – эксперимент ($R_1=60$ мм, $\delta=0,2$ мм, $L=130$ мм)

Средняя относительная погрешность при расчетах по формулам: (1) – 7,2%; (2) – 6,2%. При решении дифференциального уравнения массового расхода (3) средняя погрешность – 7,5%

На основании сравнения экспериментальных и расчетных данных можно сделать вывод о том, что результаты полученные, по формуле (2) имеют наибольшую точность, особенно в области высоких давлений. Величины, рассчитанные по выражению (1), и полученные в результате решения дифференциального уравнения (3) практически совпадают. При этом расчет по выражению (1) более простой, что позволяет рекомендовать его для вычисления проводимости при малых перепадах давлений.

Литература

- [1] Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Панфилович К.Б., Бронштейн М.Д./Исследование проводимости щелевых каналов бесконтактных вакуумных насосов в вязкостном режиме течения газа при малых перепадах давления. *Компрессорная техника и пневматика*. **2005**. №2. С.13-17.
- [2] Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Бронштейн М.Д. Исследование протечек газа через щелевые каналы в вязкостном режиме. *Компрессорная техника и пневматика*. **2005**. №7. С.19-23.
- [3] Бурмистров А.В., Саликеев С.И., Панфилович К.Б. Исследование течения газа в каналах вакуумных насосов и систем. *Известия Вузов. Машиностроение*. **2003**. №8. С.19-25.
- [4] L.-C. Valdes, Theis R., Barthod B., Desmet B. Calculating transient flows through ducts of non-constant rectangular shape. *Vacuum*. 1997. Vol.48. P.839-843.

