

*Иванов Вадим Борисович*, кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист, ООО «Фойт Турбо», Киев, Украина, e-mail: [vadim.ivanov@voith.com](mailto:vadim.ivanov@voith.com).

*Ситас Виктор Иванович*, кандидат технических наук, доцент, глава представительства, Московское представительство «Фойт Турбо», Россия, e-mail: [Victor.Sitas@voith.com](mailto:Victor.Sitas@voith.com).

*Рихтер Мартин*, региональный менеджер проектов в странах России и СНГ, Компания «Фойт Турбо ГмБХ & Ко.КГ», Крайльсхайм, Германия, e-mail: [Martin.Richter@voith.com](mailto:Martin.Richter@voith.com).

*Иванов Вадим Борисович*, кандидат технических наук, доцент, провідний фахівець, ТОВ «Фойт Турбо», Київ, Україна.

*Сітас Віктор Іванович*, кандидат технічних наук, доцент, глава представництва, Московське представництво «Фойт Турбо», Росія. *Ріхтер Мартін*, регіональний менеджер проектів в країнах Росії та СНД, Компанія «Фойт Турбо ГмБХ & Ко.КГ», Крайльсгайм, Німеччина.

*Ivanov Vadim, Ltd.* «Voith Turbo», Kyiv, Ukraine, e-mail: [vadim.ivanov@voith.com](mailto:vadim.ivanov@voith.com).

*Sitas Viktor, Moscow Representation* «Voith Turbo», Russia, e-mail: [Victor.Sitas@voith.com](mailto:Victor.Sitas@voith.com).

*Richter Martin, Voith Turbo GmbH & Co. KG, Crailsheim, Germany*, e-mail: [Martin.Richter@voith.com](mailto:Martin.Richter@voith.com)

УДК 697.244; 697.328

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47791

Никольский В. Е.

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТОВ ПОГРУЖНОГО ГОРЕНИЯ С МНОГОКРАТНОЙ ИНВЕРСИЕЙ ФАЗ

В данной работе приведены результаты исследований явления многократной инверсии фаз для восходящих газожидкостных потоков в аппаратах погружного горения (АПГ). Впервые показано, что организация многократной инверсии контактирующих фаз газ — жидкость в прямоточных АПГ установкой по высоте сепарационных решеток или клапанных тарелок интенсифицирует теплообмен и выгодно отличает их от барботажных аппаратов аналогичного назначения.

**Ключевые слова:** теплообмен, аппараты погружного горения, барботаж, инверсия фаз, энергоэффективность, контактно-модульная система, сепарационная зона.

### 1. Введение

В связи с повышением стоимости природного газа в Украине и введением режима его экономии во всех отраслях народного хозяйства, включая коммунально-бытовую сферу, большое значение приобретают исследования, связанные с разработкой нового и усовершенствованием действующего энергетического оборудования.

Контактный теплообмен двух сред (газ — жидкость) является высокоэффективным процессом, поскольку отсутствует термическое сопротивление, обусловленное наличием разделительной стенки между двумя теплоносителями. В аппаратах погружного горения (АПГ) интенсивность контактного теплообмена определяется барботажем высокотемпературных продуктов сгорания через слой жидкости. Достоинством АПГ является совмещение в одном процессе и устройстве функций генератора тепловой энергии и побудителя движения, перемешивания жидкости (циркуляционного насоса) [1, 2].

В государственном высшем учебном заведении «Украинский государственный химико-технологический университет» совместно с Институтом газа НАН Украины разработана контактно-модульная система (КМС) на основе низкоэмиссионных аппаратов погружного горения (АПГ) для газового обогрева промышленных, гражданских зданий и сооружений, а также для их использования в химической, металлургической, машиностроительной и других отраслях народного хозяйства.

В таких установках камера сгорания частично погружена под воду, а ее срез расположен в воде на глубине 400–500 мм. Продукты сгорания находятся непосред-

ственно в контакте с водой, что обеспечивает интенсивный теплообмен и позволяет уменьшить габариты теплообменного агрегата. При этом нагреваемая жидкость выступает в качестве охлаждающей среды для камеры сгорания, что имеет особое значение для цельно-металлических устройств.

КМС обладает всеми преимуществами децентрализованных систем отопления, позволяющими уменьшить расходы за счет:

- уменьшения стоимости получаемого тепла;
- точного регулирования температуры в помещениях в зависимости от погодных условий;
- уменьшения температуры в помещениях в нерабочее время и в выходные дни.

Помимо вышесказанного экономия при использовании КМС возможна еще за счет преимуществ, присущих только этому классу аппаратов:

- высокому коэффициенту полезного действия (более 100 % по отношению к низшей теплоте сгорания);
- возможности работы в режиме «нагрев-охлаждение», более экономичном, чем работа в режиме поддержания постоянной температуры в отопительных приборах;
- возможности отключать установку и выводить ее на номинальный режим работы за короткое время (3–5 минут);
- отсутствие необходимости в водоподготовке — установка работает на неподготовленной воде, без образования накипи на поверхности нагрева;
- работа установки при атмосферном давлении.

Перечисленные преимущества позволяют снизить расход природного газа на обогрев на 10–20 %.

Указанные низкоэмиссионные контактно-модульные системы на основе аппаратов погружного горения (АПГ) прошли государственные испытания [3]. Однако, возможности рассматриваемых встроенных в КМС аппаратов погружного горения по интенсификации тепломассообмена далеко не исчерпаны.

Один из путей повышения интенсификации тепломассообмена в газожидкостных системах — организация многократной инверсии контактирующих фаз (газ — жидкость). В работе показана перспективность использования явления многократной инверсии фаз для восходящих газожидкостных потоков в АПГ.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы.

В соответствии с открытием Кафарова В. В., Бляхмана М. М., Плановского А. Н. на эмульсионный способ взаимодействия газа и жидкости в момент образования 2-х фазного потока (эмульсии) при барботировании и в момент разрушения эмульсии происходит полный 100 % массообмен между фазами [4]. Именно это явление определяет инверсию фаз, когда фазы меняются местами: сплошная становится дисперсной, дисперсная — сплошной. В развитие работ Кафарова В. В. с сотрудниками по исследованию инверсии фаз в дальнейшем учеными ДВНЗ УДХТУ показано перспективность многократной инверсии фаз в газо-жидкостных реакторах [5].

В промышленности широкое распространение получили прямоточные эрлифтные и пленочные реакторы [6, 7]. Наблюдается тенденция применения насадочных и секционированных различными тарелками газожидкостных реакторов с восходящим прямоточком контактирующих фаз преимущественно для проведения процессов с практически постоянным объемом газовой фазы (например, окисление парафинов, циклогексана; аминирование и др.) или в случае незначительного его изменения по высоте аппарата (например, хлорирование бензола, толуола). Для секционирования прямоточных реакторов чаще всего используют ситчатые или колпачковые тарелки. В прямоточных секционированных газожидкостных реакторах с восходящим движением фаз можно также проводить процессы, сопровождающиеся значительным изменением объемов газовой и жидкой фаз [8]. В этом случае для увеличения диапазона устойчивой работы аппарата и интенсификации процесса тепломассообмена целесообразно секционировать его по высоте сепарационными решетками или клапанными тарелками.

## 3. Объект, цель и задачи исследования

*Объект исследования* — аппараты погружного горения с многократной инверсией контактирующих фаз.

*Цель исследований* — разработать и исследовать аппараты погружного горения с многократной инверсией контактирующих фаз с целью интенсификации тепломассообмена и повышения их энергоэффективности.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Проведение исследований эффективности контакта фаз при десорбции  $\text{CO}_2$  из воды воздухом на экспериментальной установке, имитирующей многократную инверсию фаз в аппарате погружного горения:

— определение влияния плотности орошения и скорости движения газовой фазы по сечению аппарата на общий массоперенос (эффективность инверсии);

— определение вклада различных участков газожидкостного слоя в общий массоперенос.

2. Разработка на основании экспериментальных исследований аппарата погружного горения, оборудованного сепарационными решетками для многократной инверсии контактирующих фаз.

3. Изготовление и тестирование аппарата погружного горения с многократной инверсией фаз на стенде, с целью определения его устойчивой тепловой работы на различных нагрузках и максимальной энергоэффективности.

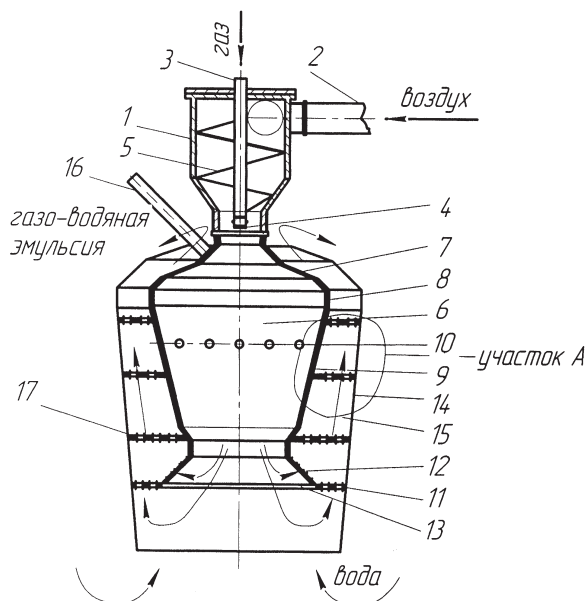
4. Оборудование прошедшим тестирование АПГ контактно-модульной системы, предназначенной для обогрева зданий различного промышленного, коммунального и сельскохозяйственного назначения.

## 4. Описание конструкции объекта исследований

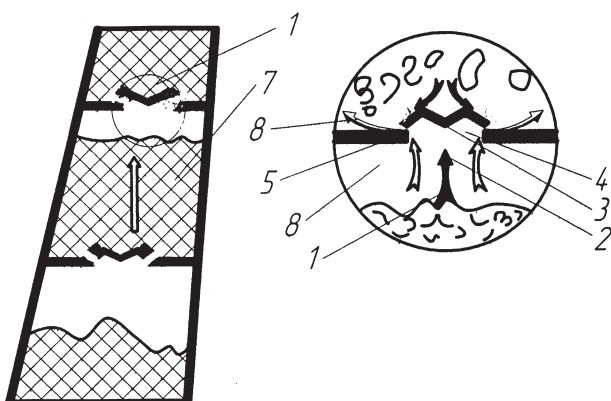
Принимая во внимание аналогию в гидродинамике и тепломассообмене в упомянутых реакторах и АПГ, автор впервые применил это техническое решение в АПГ с прямоточным движением двухфазных систем. Аппарат погружного горения с восходящим прямоточком контактирующих фаз по высоте сепарационными решетками или клапанными тарелками разбивали на несколько секций (рис. 1). В каждой секции аппарата имеет место инверсия фаз. Непосредственно на решетке (тарелке) находится газожидкостный слой, в котором сплошной фазой является жидкость, а диспергированной — газ. В объеме между газожидкостным слоем и вышележащей решеткой (тарелкой) в широком диапазоне нагрузок имеется пространство (сепарационная зона), в котором сплошной фазой является газ, а диспергированной — жидкость. Контактующие фазы из нижележащей секции в вышележащую перемещаются в результате срыва жидкости с поверхности газожидкостного слоя газовыми потоками по осям отверстий сепарационной решетки, или в полотно вышележащей тарелки вследствие эффекта Бернулли, вызванного значительным увеличением скорости газа и соответствующим увеличением скоростного и уменьшением статического напора по осям потоков.

Таким образом, в прямоточных газожидкостных аппаратах, секционированных по высоте решетками или клапанными тарелками, в значительном диапазоне скоростей контактирующих фаз имеет место инверсия фаз в каждой секции, что выгодно отличает их от барботажных аппаратов, работающих в режиме эмульгирования, или аппаратов с затопленной насадкой, характеризующихся однократным обращением фаз.

Многократная инверсия фаз в рассматриваемых аппаратах погружного горения (рис. 2) позволяет резко интенсифицировать тепломассоперенос и многие технологические процессы за счет устранения обратного перемешивания (по высоте аппарата) и создания на пути контактирующих фаз зон эффективного контакта. Согласно рис. 2, можно условно выделить 8 зон контактирования фаз (например, при использовании для секционирования эжекционных клапанных контактных устройств). При этом зоны 1, 3 и 7 характеризуются наиболее интенсивным контактом фаз в результате проявления, так называемых, входных и концевых эффектов.



**Рис. 1.** Аппарат погружного горения с многократной инверсией контактирующих фаз: 1 — горелочное устройство, 2 — патрубок для подачи воздуха, 3 — патрубок для подачи топлива, 4 — газосопловая насадка, 5 — винт-завихритель, 6 — камера сгорания, 7 — диффузор, 8 — цилиндрический участок, 9 — конфузор, 10 — система отверстий, 11 — газораспределительное устройство, 12 — перфорированный участок, 13 — основание, 14 — циркуляционная труба, 15 — кольцевой зазор, 16 — поджигающее устройство, 17 — сепарационные решетки



**Рис. 2.** Участок А. Схема движения контактирующих фаз в аппарате погружного горения с многократной инверсией фаз, секционированном тарелками с эжекционными контактно-клапанными устройствами: 1 — зона срыва жидкости газовыми струями с поверхности слоя; 2, 4, — зоны спутного движения газа и жидкости; 3 — зона удара газожидкостного потока о поверхность клапана; 5 — зона эжекции газожидкостным потоком, 7 — зона входа газожидкостного потока в барботажный слой, 8 — зона контакта в газожидкостном слое

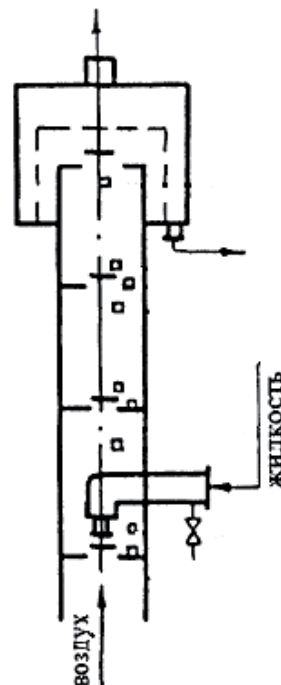
С учетом изложенного выше, изучение особенностей работы аппаратов погружного горения, секционированных решетками или клапанными тарелками, представляет определенный интерес для теории и практики массообменных и химических процессов в газожидкостных системах.

Как показано в работе [9], при исследовании локальной эффективности контакта фаз особенно важное значение приобретает правильный выбор методики отбора проб из зоны контактирования. Ставший традиционным отбор проб в виде газожидкостной смеси с последующей ее сепарацией недостаточно корректен

и вносит значительные искажения в общую картину эффективности массопереноса, так как при сепарации фаз непосредственно в сепараторе протекает интенсивный массоперенос и состав отсепарированной из пробы жидкости не соответствует составу жидкости в газожидкостном слое непосредственно в месте отбора пробы. В настоящих исследованиях использовались пробоотборники из пористого материала, обеспечивающие за счет поверхностного натяжения отбор из двухфазного потока только жидкой фазы и сепарацию фаз непосредственно в газожидкостном слое, а не в автономных сепараторах, как это делалось ранее.

### 5. Методика исследований многократной инверсии фаз

Исследования эффективности инверсии при контакте фаз проводили при десорбции  $\text{CO}_2$  из воды воздухом в прямоточных аппаратах, секционированных клапанными эжекционными тарелками. Экспериментальный аппарат, секционированный 4 тарелками, был оборудован 9 пробоотборниками жидкой фазы (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки по исследованию десорбции  $\text{CO}_2$

По результатам анализа проб жидкости строили концентрационные профили по высоте аппарата при различных скоростях газа и жидкости (рис. 2). Затем записывали уравнения материального баланса по участкам и решением полученной системы уравнений получали вклад каждой зоны в общий процесс переноса массы. Следует обратить внимание (рис. 2) на то, что при восходящем прямотоке в режиме многократной инверсии фаз появляются два дополнительных участка высокой эффективности (при срыве жидкости газом с поверхности слоя в зоне сепарации I и при ударе образовавшегося двухфазного потока о внутреннюю поверхность клапана 3 в зоне эжекции). При разрушении

газожидкостной системы высвобождается значительное количество энергии, обновляется поверхность контакта фаз, образуются быстро движущиеся пленки, струйки, капли жидкости, возникают гидравлические удары, что способствует интенсификации переноса вещества. Поэтому в прямоточных аппаратах следует ожидать более высокий вклад сепарационной зоны в общий процесс переноса. Для облегчения обработки экспериментальных данных по вкладу различных участков газожидкостного слоя в общий процесс массопередачи в ступени контакта, высоту каждой ступени разбивали на 3 зоны:

I. Зона входа газа в жидкость (включает участки 3-6 на рис. 2).

II. Зона пены (участок 7).

III. Зона сепарации фаз (участки 1-2).

## 6. Результаты экспериментальных исследований многократной инверсии фаз и их обсуждение

На рис. 4, 5 показаны в качестве примера результаты исследований, полученные при плотности орошения  $L_f = 10,3\text{--}23 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  для скоростей газа по сечению аппарата  $0,8\text{--}2 \text{ м/с}$ . Видно, что вклад отдельных зон в общий массоперенос различен, в значительной степени определяется скоростью газа.

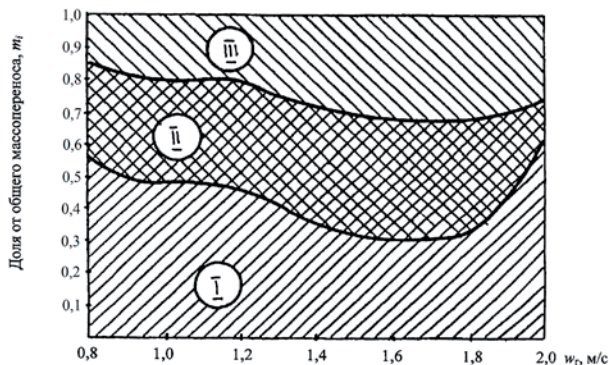


Рис. 4. Вклад в массоперенос различных зон барботажного слоя в прямоточном секционированном тарелками с эжекционными клапанными устройствами исследуемом аппарате

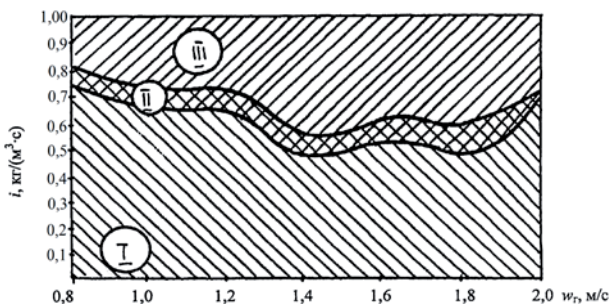


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивности массопереноса  $i$  различных зон барботажного слоя в прямоточном секционированном клапанными тарелками аппарате при плотности орошения  $L_f = 10,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Можно отметить, что наиболее эффективный массоперенос происходит в I зоне, в особенности при высоких

скоростях газа, когда усиливаются эффекты соударения и эжекции, а при средних скоростях — в III зоне, когда сепарационное пространство выражено наиболее четко и эффект многократной инверсии проявляется наиболее сильно. Интересно, что вклад III зоны слабо зависит от скорости газа (в то же время газожидкостный слой занимает до 75 % высоты аппарата). С учетом этого, видимо, не следует стремиться к увеличению расстояния между секционирующими перегородками и высоты газожидкостного слоя.

Этот вывод подтверждает рис. 5, где показана зависимость относительной интенсивности массопереноса различных зон барботажного слоя при  $L_f = 10,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Видно, что хуже всего используется объем аппарата во II зоне (зона пены), а интенсивность процесса в I зоне максимальна во всем исследованном диапазоне скоростей газа.

Из полученного экспериментального материала установлено, что вклад отдельных сепарационных участков по сечению аппарата в общий массоперенос определяется скоростью движения газовой фазы. Следовательно, целесообразно увеличить расстояние между секционированными перегородками с целью обеспечения оптимальной высоты газожидкостного слоя. Полученные результаты исследований учтены при разработке и изготовлении конструкции АПГ с многократной инверсией контактирующих фаз [3, 10].

## 7. Выводы

Таким образом, из вышеизложенного ясно, что прямоточные секционированные аппараты погружного горения с многократной инверсией фаз обладают рядом существенных преимуществ в сравнении с другими барботажными аппаратами аналогичного назначения (например, газлифтными):

- обеспечивают высокую эффективность контакта фаз;
- гарантируют стабильную работу в широком диапазоне нагрузок по газу и жидкости;
- обеспечивают большое время пребывания жидкости в ступени контакта;
- обеспечивают большое время контактирования жидкости с газом (в особенности, при использовании эжекционных контактных устройств);
- обеспечивают режим полного перемешивания жидкости в ступени контакта;
- обеспечивают режим отсутствия обратного перемешивания жидкости между ступенями контакта;
- обеспечивают транспортировку жидкости газом на более высокую отметку, что во многих случаях позволяет упростить топологию ХТС;
- просты по конструкции и в эксплуатации;
- позволяют осуществить неадиабатический режим взаимодействия фаз путем размещения теплообменных элементов внутри секций;
- обеспечивают высокую интенсивность процессов.

Отмеченные преимущества, оригинальность и простота аппаратов погружного горения с многократной инверсией фаз позволили защитить их патентами Украины [10] и оборудовать ими контактно-модульную систему, предназначенную для обогрева зданий различного промышленного, коммунального, сельскохозяйственного назначения [1].

**Литература**

1. Товажнянский, Л. Л. Теплоэнергетика погружного горения в решении проблем теплоснабжения и экологии Украины [Текст] / Л. Л. Товажнянский, Л. П. Перцев, В. П. Шапорев и др. // Интегрированные технологии и энергосбережение. — 2004. — № 3. — С. 3–12.
2. Алабовский, А. Н. Аппараты погружного горения [Текст] / А. Н. Алабовский, П. Г. Удыма. — Москва: МЭИ, 1994. — 256 с.
3. ТУ У 29.7-02070758-001: 2008. Универсальный нагреватель технологических жидкостей УНТЖ-101.01 [Текст]: техническое описание. — Днепропетровск, 2008.
4. Кафаров, В. В. Основы массопередачи. Системы газ — жидкость, пар — жидкость, жидкость — жидкость [Текст] / В. В. Кафаров. — Москва: Высшая школа, 1979. — 439 с.
5. Задорский, В. М. Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии [Текст] / В. М. Задорский. — Киев: Техника, 1979. — 198 с.
6. Рейхсфельд, В. С. Реакционная аппаратура и машины заводов основного органического синтеза и синтетического каучука [Текст] / В. О. Рейхсфельд, В. С. Шейн, В. И. Ермаков; под общ. ред. В. О. Рейхсфельда. — Л.: Химия, 1975. — 391 с.
7. Батунер, Л. М. Процессы и аппараты органического синтеза и биохимической технологии. Методы расчета [Текст] / Л. М. Батунер. — М.; Л.: Химия, 1966. — 520 с.
8. Жоров, Ю. М. Расчеты и исследования химических процессов нефтепереработки [Текст] / Ю. М. Жоров. — М.: Химия, 1973. — 213 с.
9. Задорский, В. М. Совершенствование конструкции регулярных насадок для промышленных массообменных аппаратов [Текст] / В. М. Задорский и др. // Журнал прикладной химии. — 1982. — № 8. — С. 1784–1790.
10. Апарат зануреного згорання [Текст]: Рішення на видачу пат. України № 6195/ЗУ/15 від 15.04.2015 / Нікольський, В. Є., Задорський, В. М.

**РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТІВ ЗАНУРЕНОГО ГОРІННЯ З БАГАТОРАЗОВОЮ ІНВЕРСІЄЮ ФАЗ**

В даній роботі приведені результати досліджень явища багаторазової інверсії фаз для висхідних газорідних потоків в апаратах заглибленого горіння (АЗГ). Вперше показано, що організація багаторазової інверсії контактуючих фаз газ — рідина в прямоточному АЗГ встановленням по висоті сепараційних решіток або клапанних тарілок інтенсифікує тепломасообмін і вигідно вирізняє їх від барботажних апаратів аналогічного призначення.

**Ключові слова:** теплообмін, апарати зануреного горіння, барботаж, інверсія фаз, енергоефективність, контактнo-модульна система, сепараційна зона.

---

*Нікольський Валерій Євгенєвич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра енергетики, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: iresh1@mail.ru.*

---

*Нікольський Валерій Євгенєвич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра енергетики, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ, Україна.*

---

*Nikolsky Valery, Ukrainian State Chemical-Technology University, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: iresh1@mail.ru*