

## ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 066.015.23

DOI: 10.15587/2313-8416.2018.131836

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛОННЫХ БРАГОПЕРЕГОННЫХ АППАРАТОВ С ТАРЕЛКАМИ ПРОВАЛЬНОГО ТИПА

© Г. В. Тараненко

Проведено гидродинамическое моделирование работы тарелок провального типа для параметрического ряда технологических линий брагоперегонных колонных аппаратов с различной производительностью по спирту-сырцу, установленных в колоннах большого диаметра. При гидродинамическом моделировании использовались экспериментальные данные, полученные при исследовании тарелок провального типа, установленных в колонне диаметром 0,057 м. Экспериментальные данные были получены на модельной системе воздух – вода. Скорость газа рассчитанная на полное сечение колонны составляла  $w=1,5$ , м/с

**Ключевые слова:** параметрический ряд, гидродинамическое моделирование, колонна, геометрические характеристики, ректификация, параметр  $T$ , бифуркация

## 1. Введение

Тарелки провального типа нашли достаточно широкое применение в спиртовой, химической и других отраслях промышленности [1, 2].

В спиртовой промышленности были разработаны параметрические ряды технологических

линий, которые предусматривают выработку этанола сырца, до 500 дал безводного этанола в сутки. Гипроспиртом были разработаны проекты четырех одноколонных аппаратов, техническая характеристика которых представлена в табл. 1 [1].

Таблица 1

Характеристика одноколонных брагоперегонных аппаратов

| Показатели  | Аппараты |      |      |     |
|---|----------|------|------|-----|
|   | № 3      | № 2  | № 1  | № 0 |
| Производительность аппарата по бражке с содержанием безводного спирта 8% об., дал/ч | 1050     | 790  | 430  | 263 |
| Производительность аппарата по спирту в пересчете на безводный, дал/ч               | 83       | 63   | 34   | 21  |
| Производительность аппарата по спирту в пересчете на безводный, дал/сутки.          | 2200     | 1500 | 800  | 500 |
| Производительность аппарата по спирту-сырцу 88% об., дал/сутки                      | 2270     | 1700 | 1130 | 565 |

Так как аппараты рассчитаны на разную производительность, то их геометрические, а, следовательно, и гидравлические характеристики газожидкостного слоя на массообменных тарелках будут различны. Это приводит к необходимости моделирования работы тарелок провального типа в колонных аппаратах разной производительности с целью усовершенствования методики их технологического расчета.

В [2] сообщается о переоборудовании бражной колонны ацетонобутилового производства снабженной ситчатыми тарелками на решетчатые тарелки провального типа. После переоборудования колонны производительность по бражке возросла

до 100 м<sup>3</sup>/ч при тех же условиях работы, что и до переоборудования.

Приведены выводы, что:

– при необходимости увеличить производительность бражных колонн можно рекомендовать замену колпачковых и ситчатых тарелок на тарелки провального типа, что будет способствовать увеличению производительности колонн в 2 раза;

– при строительстве новых бражных колонн необходимо их снабжать тарелками провального типа, что позволит получить экономию металла на их изготовление, упростить конструкцию тарелок и облегчить их ремонт.

## 2. Анализ литературных данных

Физическое моделирование ректификационных аппаратов проводилось в работе [1]. В [1] отмечается, что задача материального (или физического) моделирования заключается в том, чтобы, пользуясь теорией подобия, построить модель малого размера, исследование которой даст информацию о работе образца. Вопрос о физическом моделировании аппаратов для ректификации возникает в двух случаях: при необходимости исследовать новую конструкцию контактного устройства, либо проверить новую сложную технологическую схему перегонки.

В [1] рассматривались условия подобия на тарельчатых колонных аппаратах с колпачковыми тарелками. Этот вопрос изучался методом анализа размерностей величин, определяющих гидродинамическую картину процессов, идущих на тарелках и между тарелками колонны. В результате проведенного анализа, автор получил уравнение, состоящее из безразмерных комплексов размерных величин, для моделирования колонн, снабженных колпачковыми тарелками. В [1] автор отмечает, что увеличение диаметра колонны всегда ведет к уменьшению эффективности контактного устройства.

Это положение объясняется ухудшением гидродинамических условий работы больших колонн по сравнению с малыми. Сказанное относится и к тарелкам провального типа, так как и в тех и в других тарелках с увеличением диаметра тарелок возникает вероятность нарушения равномерности распределения потоков по сечению тарелки. Это приводит к тому, что при испытании колонн в малом масштабе получают более высокую эффективность, чем в аппарате крупных производственных размеров. Поэтому при испытании контактных устройств нового типа желательно проведение испытаний на установках, приближающихся по размерам к производственным. Вопрос о допустимой степени уменьшения модели, по-видимому, должен решаться для каждого типа тарелок особо [1].

Явление, когда возрастание размеров массообменных аппаратов приводит к уменьшению их эффективности, получило название масштабного эффекта [3]. Опыт показал, что масштабный эффект наблюдается при увеличении диаметра разнообразных массообменных аппаратов и химических реакторов. Была предложена новая теория масштабного перехода и вскрыта природа масштабного эффекта. Она оказалась гидродинамической, обусловленной неравномерностью распределения потоков и соотношения фаз по сечению промышленных аппаратов. Задачи уменьшения масштабного эффекта в [3] предлагается решать с помощью метода гидродинамического моделирования. Была предложена схема гидродинамического моделирования:

- на лабораторном аппарате с использованием рабочих растворов измеряют эффективность массообмена и гидродинамические характеристики;

- на этом же аппарате на выбранной для моделирования системе измеряют гидродинамические характеристики;

- на гидродинамическом стенде на модельной системе обрабатывают конструкцию промышленного

аппарата (на модели натурального размера, но меньшей высоты). Технологические испытания промышленного аппарата не проводятся, эффективность его определяют расчетным путем по отклонению гидродинамических характеристик от характеристик лабораторной модели [3].

В монографии [4] представлены результаты гидравлических исследований тарелок провального типа, проведенных на колоннах диаметрами 0,057, 0,15, 0,4 и 2,0 м. Диаметр отверстий в плате тарелок составлял 0,012 м, свободное сечение тарелок изменялось от 0,16 до 0,56. Эксперименты были проведены на модельной системе воздух – вода. В [4] определен нижний предел работы тарелок провального типа, как начало режима подвижного газожидкостного слоя (точка бифуркации). Установлено, что в этом режиме существует максимальная эффективность тарелок провального типа.

В [5] предложено уравнение для расчета нижнего рабочего предела тарелок провального типа

$$\lg\left(\frac{Y}{T^{0.5}}\right) = 0,0751 - 1,68 \cdot X \quad (1)$$

В [6] отмечается, что в уравнение (1) входит параметр  $T$ , который представляет собой отношение суммы периметров всех отверстий платы тарелки к ее диаметру. Таким образом параметр  $T$  является функцией таких геометрических параметров тарелки провального типа, как ее диаметр, свободное сечение и диаметр отверстий платы тарелки. Это дает возможность по уравнению (1) рассчитывать свободное сечение тарелок провального типа по заданной скорости, рассчитанной на полное сечение колонны, для различных диаметров колонны. Таким образом, возможно гидродинамическое моделирование тарелок провального типа с различными геометрическими характеристиками.

Уравнение (1) основано на уравнении (2) полученное в работе [7]

$$Y = B \cdot e^{-ax} \quad (2)$$

где

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_\phi} \cdot \left(\frac{\mu_\phi}{\mu_\sigma}\right)^{0,16} \quad (3)$$

$$X = \left(\frac{G_\phi}{G_n}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_\phi}\right)^{1/8} \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) представляют собой безразмерные комплексы размерных параметров, которые определяют предельных скорости работы тарелок провального типа.

Согласно теории подобия [8] в критериальное уравнение (5),

$$Eu = f'(Fr, Re, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots) \quad (5)$$

кроме безразмерных комплексов размерных параметров таких как  $Eu, Fr, Re$ , входят также симплексы геометрического подобия,  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ , определяющие условия подобия природы и модели. Отношение  $T$ , которое входит в уравнение (1), определяет условия подобия в уравнении (1), поэтому это уравнение можно использовать для моделирования тарелок провального типа.

При расчете массообменных устройств колонных аппаратов, важно правильно выбрать скорость газа (пара) рассчитанную на полное сечение колонны. Для нахождения скорости пара в аппаратах для перегонки и ректификации предложен ряд уравнений [1]. При их выводе исходят из того положения, что при определенной скорости пара к. п. д. тарелок становится оптимальным.

В [6] проведен расчет тарелок провального типа устанавливаются в укрепляющей части колонны основной ректификации производства метанола М-100. Диаметр колонны –  $D=2,4$  м; скорость пара, рассчитанная на полное сечение колонны –  $w=1,52$ , м/с. По уравнению (1) рассчитывали свободное сечение тарелки, которое составило  $f=0,12$ . После этого провели моделирование рассчитанной тарелки по уравнению (1) для колонны диаметром  $D=0,057$  м. Оказалось, что начало режима подвижного газожидкостного слоя на тарелке диаметром  $D=2,4$  м и со свободным сечением  $f=0,12$ , моделируется тарелкой со свободным сечением  $f=0,25$ , установленной в колонне  $D=0,057$  м.

В [6] делается вывод, что с помощью уравнения (1) можно осуществлять гидродинамическое моделирование работы тарелок провального типа, используя параметр  $T$ , который представляет отношение суммы периметров всех отверстий плато тарелки к ее диаметру.

Из литературного обзора можно сделать следующие выводы:

- для моделирования работы тарелок провального типа необходимо провести гидравлические исследования на колоннах различного диаметра, том числе и промышленных размеров, и получить уравнения для расчета гидродинамических параметров, которые учитывают масштабный эффект.

- по этим уравнениям рассчитать модельные параметры для колонн малого диаметра и провести исследования, с целью проверки параметров, на опытных установках с колоннами малого диаметра.

- далее необходимо проведение испытание эффективности тарелок провального типа в колоннах малого диаметра, и перенос этих данных на колонны промышленных размеров с учетом изменения гидродинамических параметров при переходе от колонн малого диаметра к колоннам промышленных размеров.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является осуществление моделирования работы тарелок провального типа большого диаметра, с использованием экспериментальных данных полученных на колонне небольшого диаметра.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Используя уравнение (1) провести гидродинамическое моделирование работы тарелок провального типа, с использованием параметра  $T$ , который представляет отношение суммы периметров всех отверстий плато тарелки к ее диаметру.

2. Показать пример расчета скорости пара в точке бифуркации тарелок провального типа диаметром  $D=0,678$  м, и диаметром  $D=0,339$  м с использованием данных полученных при исследовании тарелок провального типа в колонне с диаметром  $D=0,057$  м.

3. Рассчитать, в точке бифуркации, при скорости газа  $w=1,5$  м/с в колоннах диаметром  $D=0,678$  и  $0,339$  м при плотности орошения  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час), свободное сечение тарелок провального типа.

4. Провести исследования и определить свободное сечение тарелки провального типа при плотности орошения  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час), в колонне диаметром  $D=0,057$  м, в точке бифуркации.

5. Показать, что с помощью уравнения (1), можно осуществлять гидродинамическое моделирование газожидкостного слоя на тарелках провального типа большого диаметра ( $D=0,678$  и  $0,339$  м), используя экспериментальные данные, полученные на колонне диаметром модельного размера ( $D=0,057$  м).

### 4. Материалы и методы исследования

В качестве примера, для характеристики уравнения (1), в данной работе предлагается моделирование тарелок провального типа с целью их установки в укрепляющей части колонны одноклонного брагперегонного аппарата производства этанола производительностью 2270 и 565 по спирту-сырцу 88 % об.

Исходные данные для расчета тарелок провального типа в аппарате производительностью 2270 дал/сутки по спирту-сырцу следующие:

- расход дистиллята этанола –  $D_x=609,6$  кг/час;
- массовый расход жидкости (флегмы) –  $G_{\phi}=0,3853$  кг/с;

- средняя плотность жидкости (флегмы) в укрепляющей части колонны  $\rho_{\phi}=761,4$  кг/м<sup>3</sup>;

- средняя динамическая вязкость жидкости (флегмы) в укрепляющей части колонны при средней температуре –  $\mu_{\phi}=0,3566 \cdot 10^{-3}$  Па·с;

- динамическая вязкость воды при температуре 20°C –  $\mu_w=1,005 \cdot 10^{-3}$  Па·с;

- средняя плотность пара смеси этанол – вода в укрепляющей части колонны –  $\rho_n=1,054$  кг/м<sup>3</sup>;

- скорость пара рассчитанная на полное сечение колонны –  $w=1,5$  м/с;

- массовый расход пара –  $G_n=0,5711$  кг/с;

- диаметр отверстий плато тарелки –  $d_o=0,012$  м;

- диаметр колонны –  $D=0,678$  м;

- диаметр отверстий плато тарелки –  $d_o=0,012$  м;

- ускорение силы тяжести –  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>.

- плотность орошения составила –

$L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час).

Скорость газа в сечении колонны выбираем по рекомендациям приведенным в [1]. Она составляет  $w=1,5$  м/с, а диаметр колонны –  $D=0,678$  м.

Далее рассчитываем свободное сечение тарелок провального типа по уравнениям (1), (3), (4) методом последовательного приближения. Физико-химические константы в уравнениях (1), (3), (4) учитывали на основе корреляции Шервуда [9].

Результаты расчета представлены на графике, рис. 1. На графике  $|\varepsilon|$  – разница между левой и правой частями уравнения (1), взятая по абсолютной величине,  $f$  – свободное сечение тарелки провального типа.

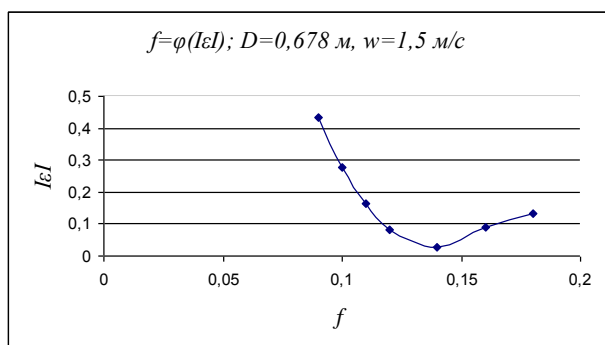


Рис. 1. График зависимости величины  $|\varepsilon|$  от  $f$  для колонны диаметром  $D=0,678$  м

В результате расчета для колонны диаметром  $D=0,678$  м выбираем свободное сечение тарелок провального типа равное  $f=0,14$ .

Из параметрического ряда бражных колонн (табл. 1) для расчета также выбираем колонну с производительностью 565 дал/сутки по спирту-сырцу 88 % об.

Исходные данные для расчета тарелок провального типа в аппарате производительностью 565 дал/сутки по спирту-сырцу следующие:

- расход дистиллята этанола –  $D_x=151,7$  кг/час;
- массовый расход жидкости (флегмы) –  $G_f=0,0958$  кг/с;
- скорость пара рассчитанная на полное сечение колонны –  $w=1,5$  м/с;
- массовый расход пара –  $G_n=0,1422$  кг/с;
- плотность орошения равна –  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час).

Остальные исходные параметры такие же, как для колонны производительностью 2270 дал/сутки по спирту-сырцу. Для этих условий диаметр колонны составил  $D=0,339$  м.

В результате расчета, для колонны диаметром  $D=0,339$  м выбираем свободное сечение тарелок провального типа равное  $f=0,16$ , рис. 2

Далее проводим моделирование газожидкостного слоя на тарелке провального типа в начале режима подвижного газожидкостного слоя, используя колонну с тарелкой провального типа диаметром  $D=0,057$  м.

Для этого задаемся скоростью пара  $w=1,5$  м/с и плотностью орошения  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час) в модельной колонне. Тогда массовый расход пара будет

$G_n=0,004032$  кг/с и массовый расход жидкости (флегмы),  $G_f=0,002826$  кг/с. Остальные расчетные параметры, такие же как для предыдущих колонн.

Задаемся рядом значений свободного сечения тарелки и определяем величину  $|\varepsilon|$ , как разницу между левой и правой частями уравнения (1), взятую по абсолютной величине.

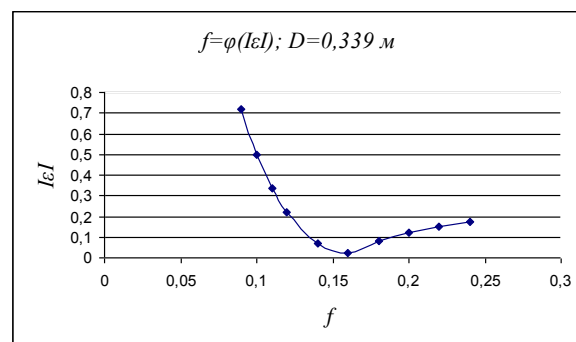


Рис. 2. График зависимости величины  $|\varepsilon|$  от  $f$  для колонны диаметром  $D=0,339$  м

Далее строим график зависимости  $f=\varphi(|\varepsilon|)$  и определяем искомое свободное сечение тарелки, установленной в колонне  $D=0,057$  м.

В результате расчета для колонны диаметром  $D=0,057$  м при скорости пара в сечении колонны  $w=1,5$  м/с, рассчитываем свободное сечение тарелок провального типа равное  $f=0,25$  (рис. 3).

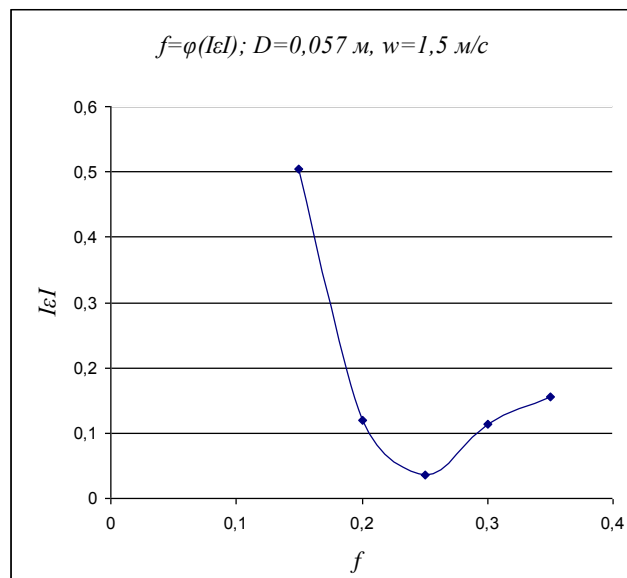


Рис. 3. График зависимости величины  $|\varepsilon|$  от  $f$  для колонны диаметром  $D=0,057$  м

Были проведены эксперименты на модельной установке с колонной  $D=0,057$  м и свободным сечением  $f=0,24$ . Диаметр отверстий в плато тарелки составлял  $d_0=0,0125$  м. Плотность орошения установили равной  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час). Измеряли гидравлическое сопротивление тарелки и высоту газожидкостного слоя на тарелке провального типа в зависимости от скорости газа в сечении колонны.

## 5. Результаты исследования

Результаты исследований показаны на графиках (рис. 4, 5).

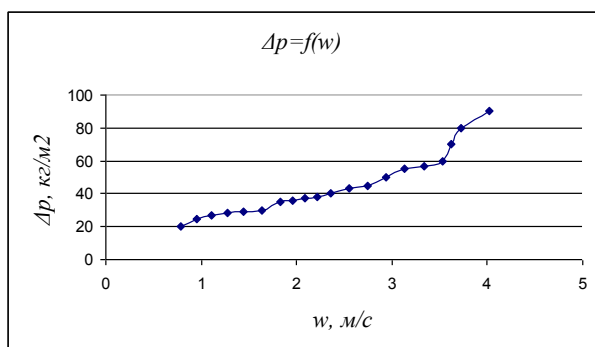


Рис. 4. График зависимости величины  $\Delta p$  от  $w$  для колонны диаметром  $D=0,057$  м

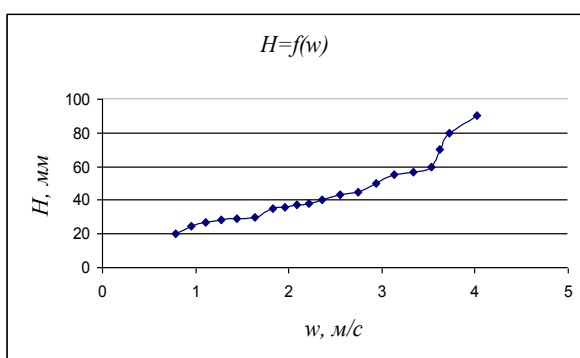


Рис. 5. График зависимости величины  $H$  от  $w$  для колонны диаметром  $D=0,057$  м

На графике зависимости высоты газожидкостного слоя от скорости газа в сечении колонны видно, что при скорости  $w=1,5$  м/с и плотности орошения  $L=5,24$  достигается режим подвижного газожидкостного слоя так как высота газожидкостного слоя достигает значения  $H=80-100$  мм.

Максимальная эффективность тарелок в режиме подвижного газожидкостного слоя подтверждается результатами исследований приведенных в [10]. Здесь приведен на рис. 2 график зависимости коэффициента обогащения  $\eta$  и высоты слоя пены  $H$  от скорости пара при ректификации смеси метанол (10 %) – вода.

Из графиков, рис. 2, следует, что при высоте пены (газожидкостного слоя)  $H=80-100$  мм достигается максимальная эффективность массообменной тарелки провального типа (коэффициент обогащения

$\eta \approx 70$  %). Это говорит о том, что на тарелке достигается режим подвижного газожидкостного слоя.

Таким образом, в результате исследований приведенных в данной работе, рис. 4 и рис. 5, видно, что экспериментальные значения гидравлических параметров исследованной тарелки близки к значениям, рассчитанным при моделировании тарелок провального типа для колонны диаметром  $D=0,057$  м.

Следует ожидать, что близкие по значению параметры работы тарелок провального типа (такие как гидравлическое сопротивление и высота газожидкостного слоя, а также эффективность работы тарелок) установятся в колонных диаметром  $D=0,678$  м и  $D=0,339$  м.

## 6. Выводы

1. Используя уравнение (1) проведено гидродинамическое моделирование работы тарелок провального типа, с использованием параметра  $T$ , который представляет отношение суммы периметров всех отверстий тарелки к ее диаметру.

2. Показан пример расчета скорости пара в точке бифуркации тарелок провального типа диаметром  $D=0,678$  м, и диаметром  $D=0,339$  м с использованием данных полученных при исследовании тарелок провального типа в колонне с диаметром  $D=0,057$  м.

3. Показано, что в точке бифуркации, при скорости газа  $w=1,5$  м/с в колоннах диаметром  $D=0,678$  и  $0,339$  м при плотности орошения  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час), свободное сечение тарелок должно составлять  $f=0,14$  и  $f=0,16$ , соответственно.

Следовательно, для моделирования скорости фаз в точке бифуркации, необходимо в колонне диаметром  $D=0,057$  м установить тарелки провального типа со свободным сечением  $f=0,25$ , при этом скорость газа рассчитанная на полное сечение колонны составит  $w=1,5$ , м/с, и плотности орошения по жидкости будет равна  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час).

4. Проведенные исследования подтвердили расчетные данные. При плотности орошения  $L=5,24$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час), в колонне диаметром  $D=0,057$  м, скорость воздуха в точке бифуркации равнялась  $w \approx 1,6$  м/с. Свободное сечение тарелки составляло  $f=0,24$ .

5. С помощью уравнения (1), можно осуществлять гидродинамическое моделирование газожидкостного слоя на тарелках провального типа большого диаметра ( $D=0,678$  и  $0,339$  м), используя экспериментальные данные, полученные на колонне диаметром модельного размера ( $D=0,057$  м).

## Литература

1. Стабников В. Н. Перегонка и ректификация этилового спирта. Москва: Пищевая промышленность, 1969. 456 с.
2. Стабников В. Н., Штромило М. И. Провальные тарелки ректификационных аппаратов и их применение на предприятиях спиртовой промышленности: обзор. Москва: ЦНИИТЭИпищепром, 1971. 20 с.
3. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / Розен А. М. и др.; ред. А. М. Розен. Москва: Химия, 1980. 320 с.
4. Тараненко Г. В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий: монография. Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2013. 174 с.
5. Taranenko G. V. Calculation of the lower operating limit dual-flow plates with different geometrical characteristics // ScienceRise. 2015. Vol. 3, Issue 2 (8). P. 67–73. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2313-8416.2015.39196>
6. Тараненко Г. В. Гидродинамическое моделирование режимов работы тарелок провального типа, установленных в колоннах различного диаметра // ScienceRise. 2017. № 6 (35). С. 34–38. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2313-8416.2017.103536>

7. Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И., Умаров С. У. К расчету колонн с провальными тарелками // Химическая Промышленность. 1958. № 3. С. 38–45.
8. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник. Москва: Химия, 1973. 752 с.
9. Sherwood T. K., Shipley G. H., Holloway F. A. L. Flooding Velocities in Packed Columns // Industrial & Engineering Chemistry. 1938. Vol. 30, Issue 7. P. 765–769. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ie50343a008>
10. Кочергин Н. А., Олевский В. М., Дильман В. В. Исследование работы тарелок провального типа в условиях ректификации // Химическая Промышленность. 1960. № 7. С. 63–67.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Созонтов В. І.*

*Дата надходження рукопису 03.05.2018*

**Тараненко Геннадий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиноведения и оборудования промышленных предприятий, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, пр. Центральный, 59-а, г. Северодонецк, Украина, 93400  
E-mail: [gtaranenko@ukr.net](mailto:gtaranenko@ukr.net)

УДК 004.94:519.63

DOI: 10.15587/2313-8416.2018.131866

## ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СПЛАВЛЕННІ БІМЕТАЛУ СКАНУЮЧИМ ЛАЗЕРОМ ДЛЯ ПРОМЕНІВ, ЩО ФОКУСУЮТЬСЯ В ПРЯМОКУТНИК І В КРУГ

© **О. В. Перекіпська, В. А. Третяк, Г. А. Остапенко**

*Розглянуто задачу моделювання теплового поля в процесі сплавлення біметалу скануючим лазером та променем, що фокусується в смугу. Використано математичну модель процесу, що являє собою граничну задачу у вигляді тривимірного нестационарного диференційного рівняння в частинних похідних. Проведено порівняння результатів моделювання при різних варіантах форми лазерного променя та розподілом потужності за ключовими характеристиками*

**Ключові слова:** *сплавлення біметалу, лазерне наплавлення, теплове поле, метод скінчених різниць, наскрізний розрахунок*

### 1. Вступ

Останнім часом в промисловості поширюється використання біметалів, завдяки їхнім фізико-механічним властивостям. Для виготовлення біметалів може бути використане лазерне наплавлення, причому в деяких випадках даний метод має ряд суттєвих переваг [1, 2]. Однією з таких переваг є можливість автоматизації процесу [1], що потребує інструментів комп'ютерного моделювання. Крім того, методи числового моделювання дозволяють суттєво зекономити ресурси на натурні дослідження [3]. Таким чином, створення програмних засобів для моделювання та автоматизації процесу сплавлення біметалу за допомогою лазера є актуальною.

Дана стаття присвячена розв'язанню задачі моделювання температурного поля в процесі сплавлення біметалу за допомогою лазера. Розглядається метод отримання двошарового біметалу шляхом лазерного наплавлення шару покриття на основу. Основними способами доставки в зону наплавлення матеріалу покриття при лазерному сплавленні біметалу є попереднє нанесення та інжекція в зону дії лазерного випромінювання [4], в роботі розглядається останній. Особливу цікавість представляє спосіб попереднього розплавлення лазером матеріалу основи, технологічно він може бути реалізований за допомогою сканування області подачі матеріалу покриття стандартним лазером з круглою плямою фокусування або з використанням лазера, що фокусується в смугу, відповід-

ну області подачі покриття. Для вибору одного з них виникає необхідність проведення порівняльного аналізу динаміки теплового поля для цих варіантів.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні існує велика кількість програмних засобів чисельного моделювання різноманітних процесів, в тому числі і для моделювання температурного поля. Найвідомішими засобами моделювання є: Ansys (ANSYS, Inc.) реалізує метод скінчених елементів і застосовується для розв'язку та оптимізації задач газодинаміки, теплофізики, міцності тощо. Star-CD (Computational Dynamics) є ефективним інструментом для задач гідродинаміки. PHOENICS дозволяє моделювати рух газів та рідин, зручний для моделювання напружено-деформаційного стану. NASTRAN створений для моделювання напружено-деформаційного стану. LVMFlow – розроблений для автоматизації ливарних процесів [3].

Зазначені програмні засоби є потужними та зручними, проте необхідність враховувати такі особливості процесу як локальність, інтенсивність впливу та високу швидкість лазерного променя, практично унеможливають використання наведених інструментів для її розв'язання. Для отримання результатів розрахунку за допомогою цих засобів необхідно або значно спрощувати математичну модель, або сам алгоритм розрахунків, що може приз-