

УДК 663.551.41

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАПАННОЙ ТАРЕЛКИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ И ПРЯМОТОЧНОЙ КЛАПАННОЙ ТАРЕЛКИ

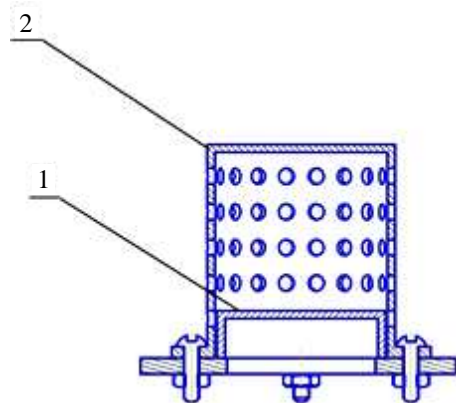
Д.Н. МАЙТАМ

Представлена новая конструкция клапанной тарелки. Приведены результаты экспериментальных исследований и сопоставительный анализ основных рабочих характеристик тарелки новой конструкции (эффективность массопередачи, межтарельчатый унос жидкости) и существующего аналога. Исследования проведены для четырех различных вариантов конструктивного исполнения колпачков тарелки. Сделан вывод, что клапанная тарелка новой конструкции отличается улучшенными массообменными и гидродинамическими характеристиками по сравнению с прямоточной. Получены математические модели, описывающие зависимости эффективности тарелки от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки.

Ключевые слова: тарелки клапанные и прямоточные; дисковые клапаны; колпачки; рабочие характеристики, сопоставительный анализ.

Клапанные тарелки имеют широкое применение в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Основные преимущества этих тарелок – способность обеспечить эффективный массообмен в большом интервале рабочих нагрузок, несложность конструкции, низкая металлоемкость и невысокая стоимость. Клапанные тарелки изготавливают с дисковыми и прямоугольными клапанами; работают тарелки в режиме прямоточного или перекрестного движения фаз. В промышленности наиболее распространены клапанные прямоточные тарелки с дисковыми клапанами [1].

Основная часть. Объектом представляемого исследования является новая клапанная тарелка [2], саморегулирующиеся дисковые клапаны 1 которой устанавливаются в перфорированные колпачки 2, на отверстия полотна, способны подниматься при движении пара (газа), что проиллюстрировано рисунком 1.



1 – саморегулирующийся дисковый клапан;
2 – перфорированный колпачок

Рисунок 1. – Клапан исследуемой тарелки

Диаметр отверстий в тарелке для прохода газовой фазы несколько меньше диаметра дисковых клапанов и перфорированных колпачков, благодаря чему клапан удерживается на тарелке. Высота подъема клапана ограничивается высотой колпачка. Колпачки крепятся к полотну тарелки при помощи болтов. Свободно лежащий над отверстием в тарелке клапан с изменением расхода газа своим весом автоматически регулирует величину площади зазора между клапаном и плоскостью тарелки для прохода газа и тем самым поддерживает постоянной скорость газа при его истечении в барботажный слой. При этом с увеличением скорости газа в колонне гидравлическое сопротивление клапанной тарелки увеличивается незначительно.

Конструктивные параметры клапана новой тарелки оптимизированы и выбраны по определенным критериям.

Надежность и равномерность работы. При переменных нагрузках по газу и жидкости, неравномерности распределения газового потока по сечению колонны новая тарелка обеспечивает правильное регулирование свободной

поверхности для выхода газа благодаря саморегулированию клапанов и конструкции клапанов, исключая возможность их перекоса.

Минимизация провала жидкости на новой тарелке достигается путем минимизации свободного сечения для выхода газа при минимальных нагрузках по газу и созданию гидравлического лабиринта, препятствующего провалу жидкости через клапаны.

Компенсация прямоточного движения взаимодействующих фаз и максимизация поверхности контакта фаз реализуется на новой тарелке за счет следующих факторов: широкого диапазона устойчивой работы тарелки в пенном режиме благодаря барботированию газа в виде мелких пузырьков и струй газа, образующихся при выходе газа из перфорированных колпачков; максимизации перфорации колпачка в условиях ограничений, таких как требуемая прочность конструкции клапана при изготовлении и работе; возможность засорения отверстий клапана (применение отверстий с диаметром менее 2 мм нецелесообразно).

Автором проведены исследования новой тарелки с двумя значениями высоты колпачков: 27 и 21 мм. Кроме этого, в двух вариантах выполнена перфорация колпачка: с диаметром отверстий 2 и 3 мм.

Основные параметры исследуемой тарелки представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные параметры исследуемой тарелки

Параметр	Вариант	Вариант	Вариант	Вариант
	1-го колпачка	2-го колпачка	3-го колпачка	4-го колпачка
Диаметр отверстий перфорации колпачка, мм	2	3	2	3
Высота колпачка, мм	27		21	
Количество отверстий перфорации колпачка	65		52	
Количество рядов отверстий по высоте колпачка	5		4	
Количество отверстий в горизонтальном ряду колпачка	13			
Внутренний диаметр колонны, мм	144			
Толщина полотна тарелки, мм	3			
Внутренний диаметр колпачка, мм	22			
Внешний диаметр клапана, мм	21,8			
Масса клапана, г	6			
Высота клапана, мм	6			
Число клапанов на тарелке	7			
Площадь поперечного сечения колонны, м ²	0,01629			
Площадь всех отверстий, м ²	0,0022			
Доля свободного сечения тарелки φ, %	13,5			
Площадь рабочего сечения тарелки, м ²	0,01078			

В представляемой работе проводится сопоставление массообменных характеристик *клапанной тарелки новой конструкции* с характеристиками *прямоточной клапанной*, на основе которой разработана тарелка новой конструкции.

Клапанная прямоточная тарелка (объект для сравнения) разработана во ВНИИнефтемаше, её клапан (рисунок 2) представляет собой круглую конструкцию в виде диска с двумя направляющими и одной задней ножкой.

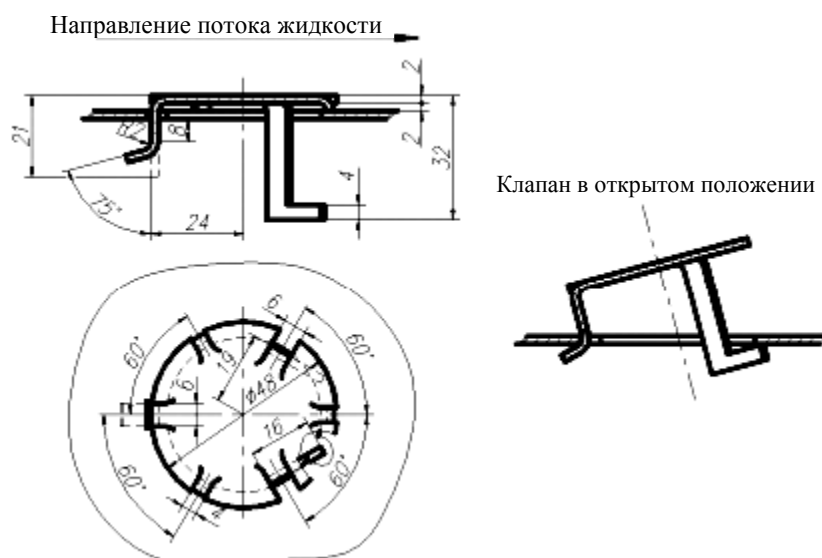


Рисунок 2. – Клапан прямоточной клапанной тарелки

Выбор прямоточной клапанной тарелки (ПК) в качестве объекта сравнения обусловлен следующими факторами:

- тарелка ПК успешно используется во многих процессах нефтепереработки и нефтехимии;
- большой накопленный опыт промышленной эксплуатации тарелки ПК и наличие данных о гидродинамических и массообменных характеристиках тарелки;
- в качестве данных для сравнения гидродинамических и массообменных характеристик тарелки ПК с таковыми для тарелки новой конструкции в данной работе используются результаты проведенных исследований в работе [3].

Основные параметры сравниваемых тарелок приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Основные параметры сравниваемых тарелок

Параметр	Клапанная тарелка новой конструкции	Тарелка прямооточная клапанная
Размер сечения колонны, мм	Ø144	630×160
Толщина полотна тарелки, мм	3	2
Диаметр отверстия под клапан, мм	20	40
Масса клапана, г	6	35
Число клапанов на тарелке	7	12
Площадь поперечного сечения колонны, м ²	0,01629	0,1008
Площадь всех отверстий, м ²	0,0022	0,0151
Доля свободного сечения тарелки ф, %	13,5	14,95
Площадь рабочего сечения тарелки, м ²	0,01078	0,0864

Сопоставление уноса жидкости с тарелок. Проанализируем работу тарелок по показателю «межтарельчатый унос жидкости». Унос жидкости на вышележащие тарелки потоком паров приводит к ухудшению эффективности работы тарелок и увеличению их жидкостных нагрузок. Поэтому при гидравлическом расчете необходимо определять в том числе и величину межтарельчатого уноса при рабочих нагрузках тарелки по пару и жидкости.

При измерении величины уноса жидкости на новой конструкции тарелки приведенная скорость w изменялась в диапазоне 1,7...2,21 м/с. Измерения проводились при различной плотности орошения тарелки q : 8,6 м³/м²·ч; 10,8 м³/м²·ч; 13,2 м³/м²·ч; 15,5 м³/м²·ч. Высота сепарационного пространства H (расстояние от тарелки до сборника жидкости) в ходе эксперимента принимала фиксированные значения 280 и 380 мм.

В ходе анализа величины уноса жидкости на тарелке новой конструкции осуществлялось её сравнение с расчетными значениями для тарелок с дисковыми клапанами. Расчетные значения уноса жидкости для таких тарелок определялись согласно данным работы [4] по уравнению (1):

$$e = 0,757 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{w^{2,7}}{H^3}, \quad (1)$$

где e – относительный унос жидкости на вышележащую тарелку, кг жидкости/кг газа; w – скорость газа в колонне, м/с; H – расстояние между тарелками, м.

На рисунках 3–6 представлены результаты сопоставления экспериментальных значений межтарельчатого уноса жидкости с тарелки новой конструкции с расчетными значениями величины уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами, найденными по уравнению (1).

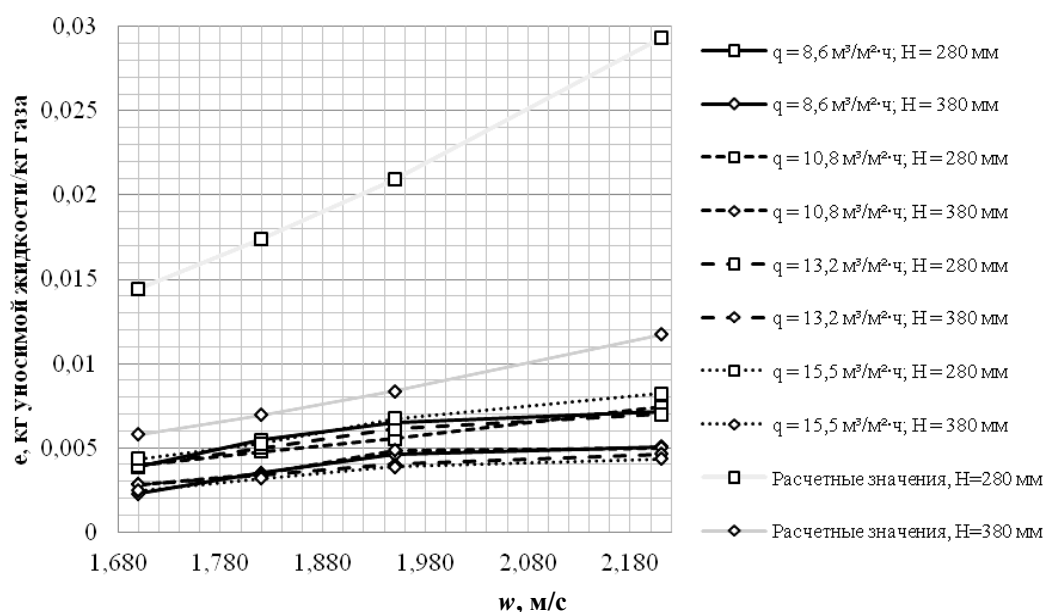


Рисунок 3. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 1-го колпачка) и с тарелки с дисковыми клапанами

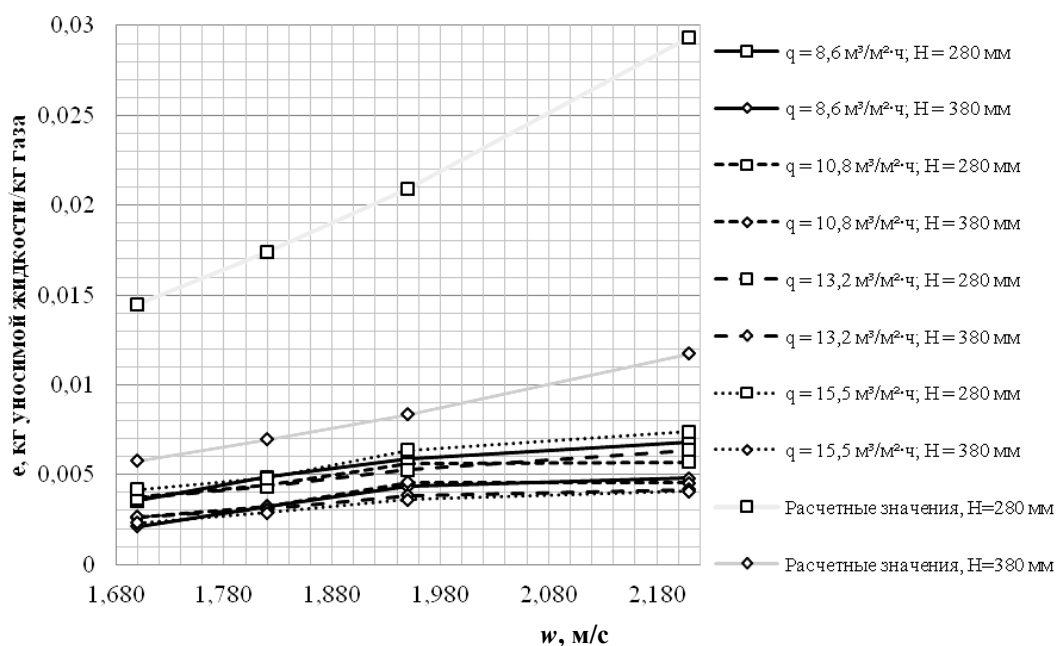


Рисунок 4. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 2-го колпачка) и с тарелок с дисковыми клапанами

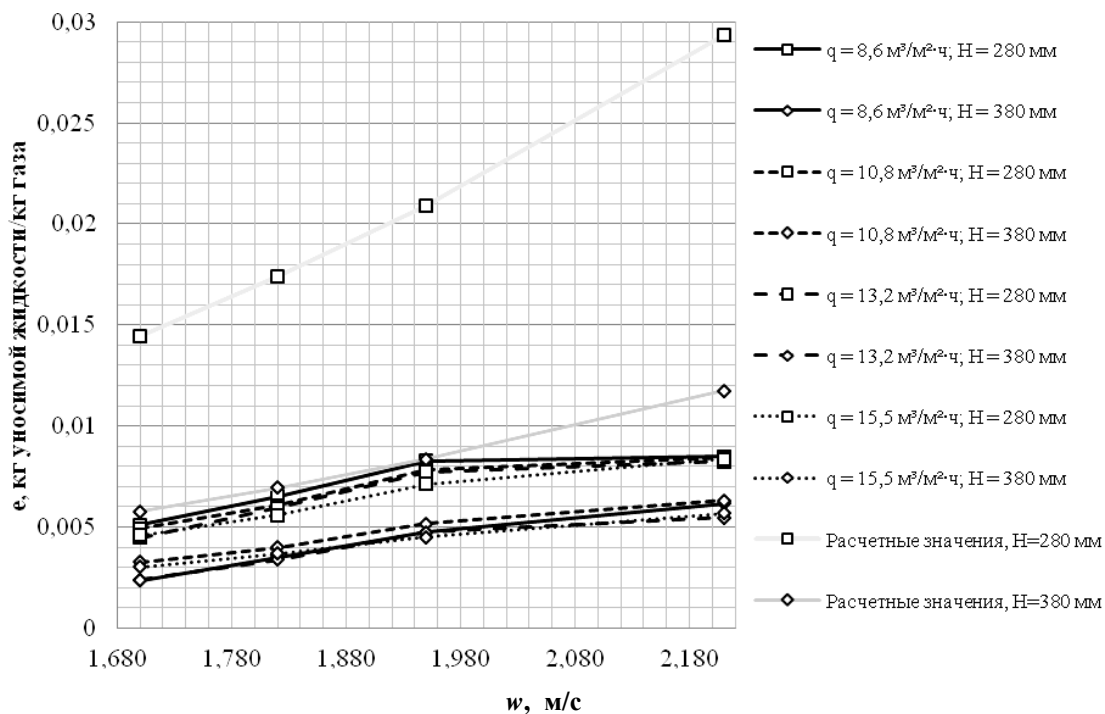


Рисунок 5. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 3-го колпачка) и с тарелок с дисковыми клапанами

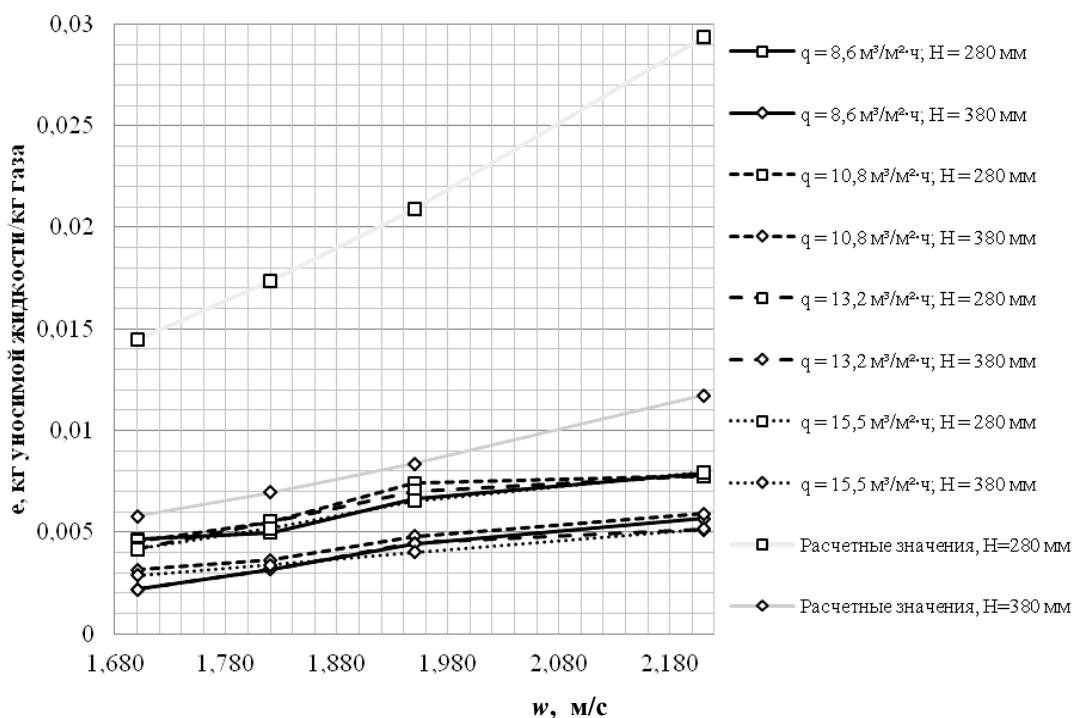


Рисунок 6. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (вариант 4-го колпачка) и с тарелок с дисковыми клапанами

Исходя из анализа приведенных графиков (см. рис. 3–6), а также принимая во внимание разработанные в литературных источниках расчетные методики определения межтарельчатого уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами [4], предлагается следующее общее выражение зависимости межтарельчатого уноса жидкости от скорости газа и расстояния между тарелками:

$$e = A \cdot \frac{w^B}{H^C} \quad (2)$$

Здесь A , B и C – коэффициенты регрессии.

В результате статистической обработки экспериментальных данных и нахождения коэффициентов A , B и C установлено, что зависимость межтарельчатого уноса жидкости для тарелки новой конструкции имеет вид:

$$e = 2,60 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{w^{2,10}}{H^{1,37}}, \quad R = 0,93, \quad (3)$$

где R – коэффициент корреляции предложенной модели.

Проанализировав результаты экспериментальных измерений значений уноса жидкости для тарелки новой конструкции, необходимо отметить стабильность работы тарелки в широком интервале скоростей по пару и незначительное увеличение доли уносимой жидкости. Сопоставление величины межтарельчатого уноса жидкости с клапанной тарелки новой конструкции с расчетными значениями величины уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами позволяет сделать вывод о превосходстве тарелки новой конструкции по данному параметру над тарелками с дисковыми клапанами.

Сопоставление эффективности массопередачи по газу. На новой конструкции тарелки также исследовали эффективность массопередачи при насыщении воздуха влагой. Эффективность при испарении жидкости определялась на системе воздух – вода с учетом влажности воздуха на входе x_{ex} , кг/м³, в колонну и выходе $x_{вых}$, кг/м³, из нее по формуле (4):

$$E = \frac{x_{вых} - x_{ex}}{x_{100} - x_{ex}}, \quad (4)$$

где x_{100} – абсолютная влажность воздуха, насыщенного водяным паром, кг/м³.

В данной работе исследовалась эффективность массопередачи новой конструкции тарелки по газу при насыщении воздуха влагой в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки. При этом фактор скорости газа варьировался в пределах от 1,08 до 2,3 кг^{0,5}/(м^{0,5}·с), плотность орошения q изменялась в пределах от 8,6 до 15,5 м³/(м²·ч).

Анализ экспериментальных значений эффективности по газу тарелки новой конструкции показал:

- плотность орошения тарелки q значительно влияет на величину эффективности тарелки.
- С увеличением значения плотности орошения тарелки наблюдался рост эффективности тарелки;
- также на величину эффективности тарелки существенно влияет фактор скорости газа F_p .

С ростом фактора скорости газа эффективность тарелки увеличивается, при этом можно выделить два основных режима работы тарелки. Первый режим характеризуется существенным увеличением эффективности тарелки с ростом фактора скорости газа. Дальнейшее увеличение фактора скорости, после перехода в следующий режим работы тарелки, приводит к незначительному увеличению эффективности тарелки.

Для определения эффективности тарелки новой конструкции по газу предложена следующая математическая модель:

$$E_v = q^{b_0} \cdot \exp(b_1 \cdot F_p + b_2 \cdot F_p^2 b_1 + b_3 \cdot F_p^3), \quad (5)$$

где E_v – эффективность тарелки по газу; q – плотность орошения тарелки, м³/(м²·ч); F_p – фактор скорости газа в рабочем сечении тарелки, кг^{0,5}/(м^{0,5}·с); b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

Уравнение (5) предложено как уравнение общего вида для определения эффективности по газу для тарелки нового типа. Коэффициенты в данном уравнении находятся с помощью статистических методов для каждого отдельно взятого конструктивного исполнения тарелки. Регрессионный анализ данных для определения коэффициентов уравнения эффективности выполнен в программе Statistica.

Полученные зависимости величины эффективности тарелки от фактора скорости газа и интенсивности орошения тарелки нового типа для различных вариантов конструктивного исполнения колпачка новой тарелки приведены на рисунках 7–10.

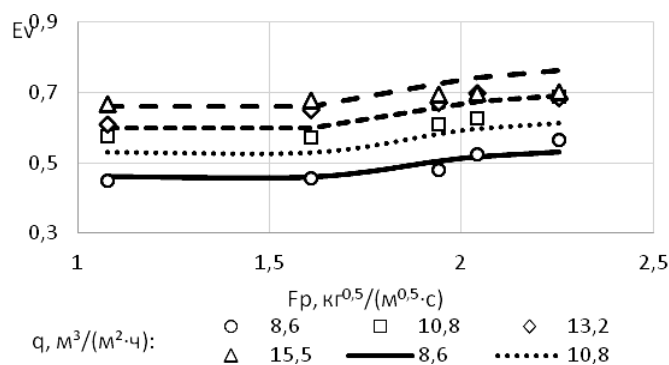


Рисунок 7. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 1-го колпачка

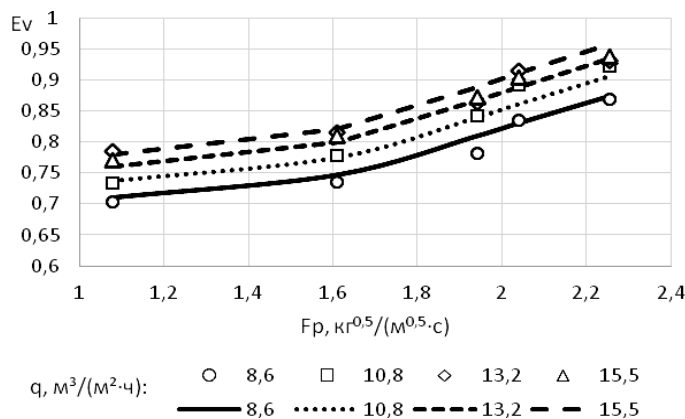


Рисунок 8. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 2-го колпачка

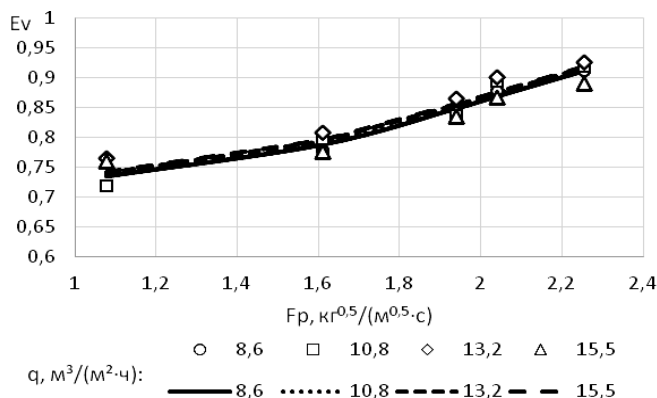


Рисунок 9. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 3-го колпачка

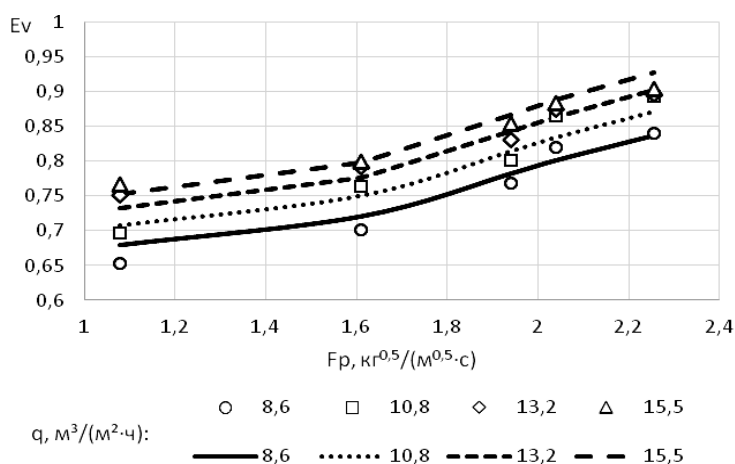


Рисунок 10. – Зависимость эффективности тарелки по газу от плотности орошения и фактора скорости газа, вариант 4-го колпачка

Анализ экспериментальных значений эффективности по газу тарелки новой конструкции показал, что плотность орошения тарелки (q) и фактор скорости газа (F_p) существенно влияют на величину эффективности тарелки. Установлено, что с увеличением их значений происходит рост эффективности массопередачи тарелки по газу.

Устойчивая работа усовершенствованной клапанной тарелки наблюдается в диапазоне изменения фактора скорости по газу (F_p) от 1,08 до 2,3 кг^{0,5}/м^{0,5}·с. При этом на тарелке возникает газо-жидкостная дисперсная система – пена, что соответствует пенному режиму работы тарелки. В указанном режиме контактирование газа и жидкости происходит на поверхности пузырьков и струй газа, а также на поверхности капель жидкости, которые в большом количестве образуются над барботажным слоем при выходе пузырьков газа из барботажного слоя и разрушении их оболочек. В пенном режиме поверхность контакта фаз на тарелке максимальна.

Результаты исследования показали высокие значения эффективности тарелки новой конструкции по газу. Эффективность разработанной клапанной тарелки достигает 94% при насыщении воздуха влагой, в то время как эффективность стандартной клапанной тарелки не превышает 88% [5, с. 258, рис. VII-22].

Сопоставление эффективности массопередачи по жидкости. На тарелке исследовали эффективность массопередачи при десорбции углекислого газа из воды воздухом. Концентрация углекислого газа в воде определялась значением рН воды с помощью эмпирического выражения (6):

$$X = 2,69 \cdot 10^{5-pH}. \quad (6)$$

Зависимость (6) для концентрации углекислого газа в воде от кислотности раствора в диапазоне рН 5...7 получена на основании обработки экспериментальных данных в работе [5].

Уравнение эффективности массопередачи по жидкости имеет вид:

$$E_{ML} = \frac{X_H - X_K}{X_H - X^*}. \quad (7)$$

В уравнении (7) X_H, X_K, X^* – концентрации CO_2 в воде, г/л, соответственно на входе на тарелку, на выходе из тарелки и в жидкости, равновесной со средним составом уходящего с тарелки воздуха Y_K .

Концентрацию углекислого газа в жидкости X^* , равновесной со средним составом уходящего с тарелки воздуха Y_K , определим по формуле

$$X^* = \frac{Y_K}{K}.$$

Здесь K – константа фазового равновесия углекислого газа, которая достаточно велика.

В специальной литературе приводятся значения для K , имеющие порядок 10^3 . Поэтому можно считать равновесную концентрацию X^* участвующего в массообмене углекислого газа в воде равной 0 и с достаточной степенью точности принять

$$E_{ML} = \frac{X_H - X_K}{X_H}. \quad (8)$$

Используя уравнение (6), формулу (8) можно переписать в виде:

$$E_{ML} = 1 - 10^{-(\text{pH}_K - \text{pH}_H)}, \quad (9)$$

где pH_H и pH_K – pH воды на входе и выходе с тарелки соответственно.

Уравнение (9) использовано при нахождении опытных значений эффективности тарелки по жидкости.

В работе исследовалась эффективность тарелки по жидкости при десорбции углекислого газа из воды воздухом в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки. При этом фактор скорости газа варьировался в пределах от 1,08 до 2,3 $\text{кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с})$, плотность орошения q изменялась в пределах от 8,6 до 15,5 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

На основе анализа экспериментальных значений эффективности по жидкости тарелки новой конструкции сделаны следующие *выводы*:

1) плотность орошения тарелки q значительно влияет на величину эффективности тарелки. С увеличением значения плотности орошения тарелки наблюдалось снижение эффективности тарелки по жидкости;

2) существенное влияние на величину эффективности тарелки по жидкости оказывает также фактор скорости газа F_p . С ростом фактора скорости газа эффективность тарелки увеличивается. При этом также можно выделить *два основных режима работы тарелки*:

- при работе тарелки в первом режиме, или режиме саморегулирования, наблюдается значительный рост эффективности тарелки с увеличением фактора скорости газа, замедляющийся при приближении к значению фактора скорости газа, характерному для перехода во второй режим, в котором клапан находится в крайнем верхнем положении;

- при дальнейшем увеличении фактора скорости газа во втором режиме работы тарелки снова наблюдается значительное увеличение эффективности тарелки по жидкости. При этом данный рост эффективности тарелки во втором режиме работы пропорционален плотности орошения тарелки;

3) для тарелок с меньшим диаметром отверстий перфорации колпачка (вариант 1-го и вариант 3-го конструктивного исполнения) характерно снижение влияния плотности орошения тарелки на эффективность при увеличении фактора скорости газа.

На основе данных выводов для нахождения эффективности тарелки по жидкости предложена следующая математическая модель:

$$E_L = q^{b_0} \cdot \exp(b_1 \cdot F_p + b_2 \cdot F_p^2 + b_3 \cdot F_p^3 + b_4 \cdot F_p^4), \quad (10)$$

где E_L – эффективность тарелки по жидкости; q – плотность орошения тарелки, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; F_p – фактор скорости газа в рабочем сечении тарелки, $\text{кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с})$; b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии.

Уравнение (10) в данной работе предложено в качестве общего уравнения эффективности по жидкости для тарелки нового типа. Коэффициенты в уравнении (10) находятся с помощью статистических методов для каждого отдельно взятого конструктивного исполнения тарелки.

Регрессионный анализ данных для определения коэффициентов уравнения эффективности выполнен в программе Statistica.

С целью сопоставления массообменных характеристик клапанной тарелки новой конструкции и тарелки ПК построены совместные графики зависимостей эффективности тарелки от фактора скорости газа, представленные на рисунках 11–14.

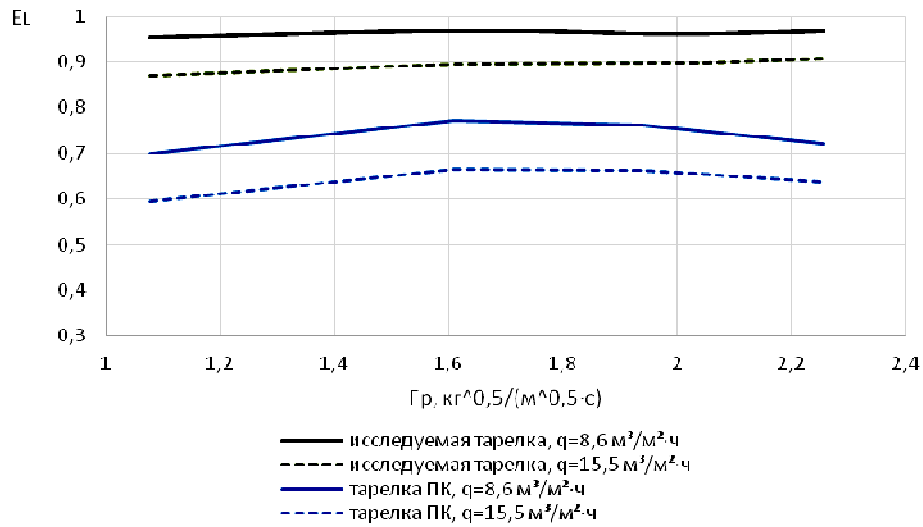


Рисунок 11. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 1-го колпачка) и прямоточной клапанной тарелки

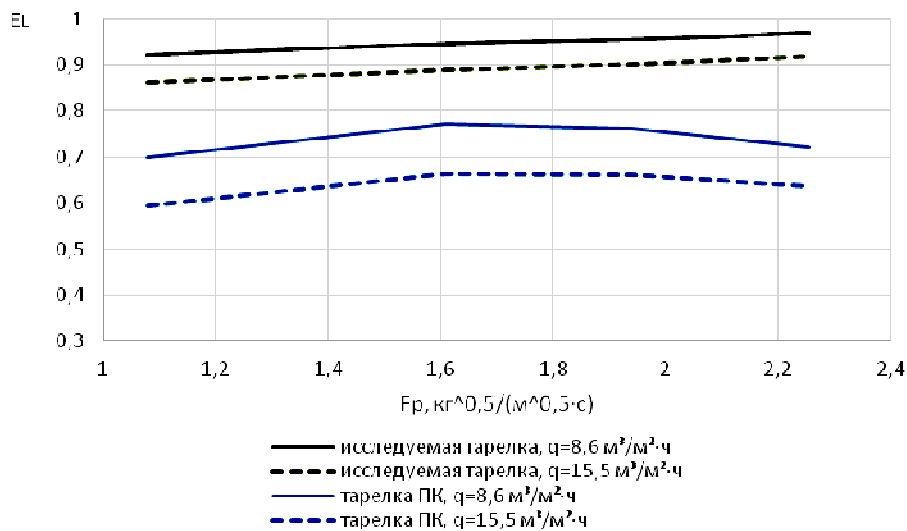


Рисунок 12. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 2-го колпачка) и прямоточной клапанной тарелки

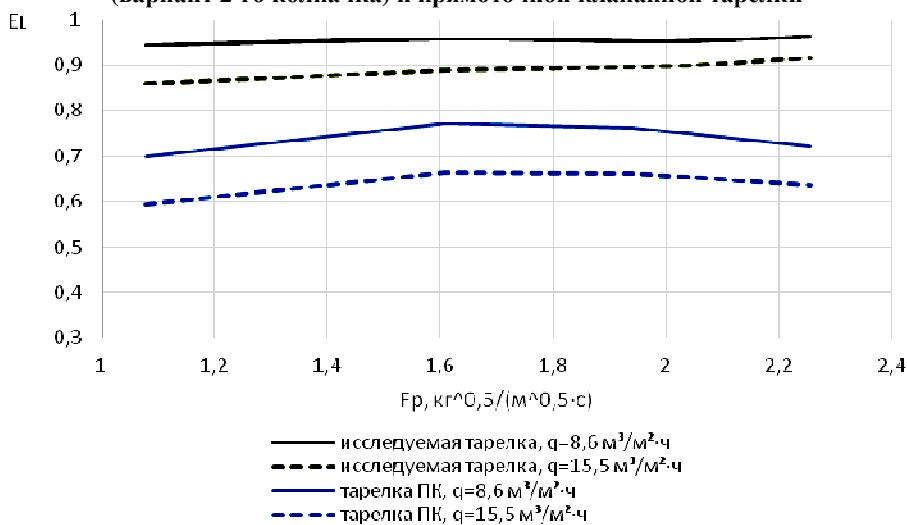


Рисунок 13. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 3-го колпачка) и прямоточной клапанной тарелки

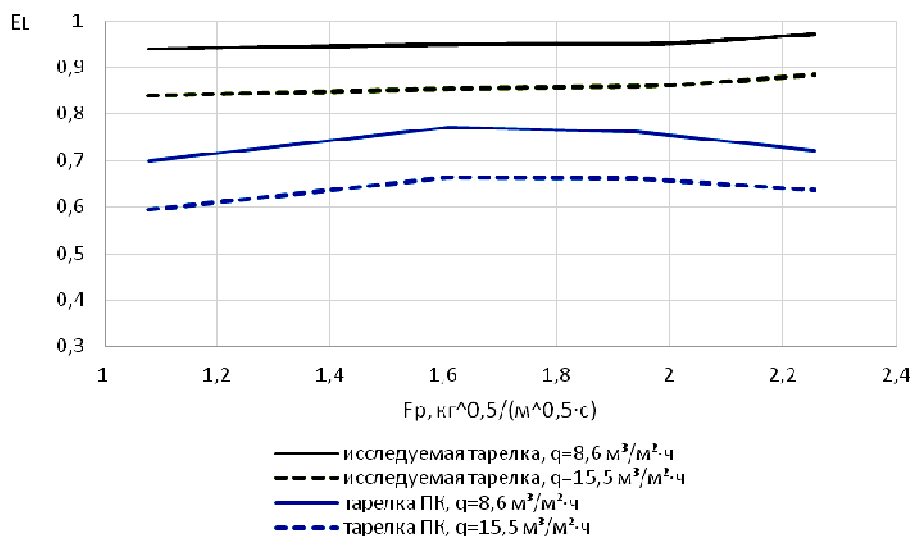


Рисунок 14. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (вариант 4-го колпачка) и прямооточной клапанной тарелки

Также построен график отношения эффективности исследуемой тарелки к эффективности тарелки прямооточной клапанной (рисунок 15). Ввиду относительно близких значений эффективности тарелок с различными вариантами колпачков для построения данного графика взяты усредненные значения эффективности для тарелок с четырьмя различными вариантами колпачков.

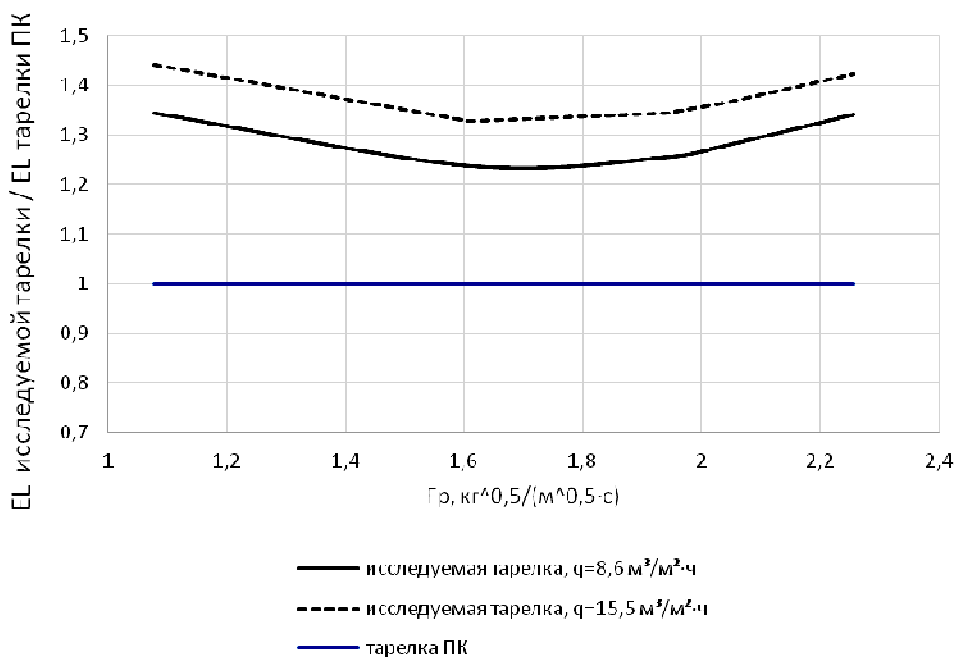


Рисунок 15. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции и прямооточной клапанной тарелки

Заключение. Эффективность клапанной тарелки новой конструкции по жидкости во всем исследуемом диапазоне изменения факторов (интенсивность орошения тарелки, фактор скорости газа) существенно превышает эффективность тарелки ПК:

- эффективность клапанной тарелки новой конструкции при интенсивности орошения $q = 8,6 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ в 1,24...1,35 раза выше, чем интенсивность тарелки ПК;

- эффективность клапанной тарелки новой конструкции при интенсивности орошения $q = 15,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ в 1,33...1,45 раза выше, чем интенсивность тарелки ПК.

Эффективность разработанной клапанной тарелки по газу достигает 94%, в то время как эффективность стандартной клапанной тарелки не превышает 88%.

На основе результатов проведенных исследований массообменных характеристик клапанной тарелки новой конструкции получены математические модели, описывающие зависимости эффективности тарелки от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки. Все исследования проведены для четырех различных вариантов конструктивного исполнения колпачков тарелки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машины и аппараты химических производств / И.И. Поникаров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 368 с.
2. Тарелка клапанная : полез. модель ВУ 10370 / В.Б. Халил, Майтам Джабар Наджим. – Оpubл. 30.10.2014.
3. Ларькин, А.В. Исследование гидродинамики и массопередачи на прямооточной клапанно-ситчатой тарелке новой конструкции : дис. ... канд. техн. наук / А.В. Ларькин. – М., 2014.
4. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки / Е.Н. Судаков [и др.]. – М. : Химия, 1979. – 569 с.
5. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А.И. Скобло [и др.]. – М. : Недра, 2000. – 677 с.

Поступила 11.07.2017

MAIN CHARACTERISTICS COMPARISON OF VALVE PLATE OF NEW DESIGN AND DIRECT VALVE PLATE

D. MAITAM

A new design of the valve plate is presented. The results of experimental studies and a comparative analysis of the basic performance characteristics of a new design plate are presented: mass transfer efficiency and interfinal liquid drift with the existing analog. Studies have been carried out for four different versions of the design of the tray caps. It is concluded that the valve plate of the new design is characterized by improved mass exchange and hydrodynamic characteristics in comparison with the direct flow. Mathematical models are obtained that describe the dependence of the efficiency of the plate on the gas velocity factor and the irrigation density of the plate.

Keywords: *valve plates and direct flow; disc valves; caps; working characteristics, comparative analysis.*