

УДК 66.021.3/4

UDC 66.021.3/4

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕПАРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИХРЕВОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА

NUMERICAL STUDY OF SEPARATION EFFICIENCY OF A VORTEX CONTACT DEVICE

Санников Илья Викторович
аспирант

SPIN – код автора: 5849-9479

*Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
Нижнекамск, Россия*

Sannikov Ilya Victorovich
Postgraduate student

RSCI SPIN-code: 5849-9479

*Nizhnekamsk Institute of Chemistry and Technology,
branch of Kazan National Research Technological
University (KNRTU), Nizhnekamsk, Russia*

Мадышев Ильнур Наилевич

Канд. техн. наук, доцент

SPIN – код автора: 9697-9220

*Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
Нижнекамск, Россия*

Madyshev Ilnur Nailovich

Cand.Tech.Sci., associate professor

RSCI SPIN-code: 9697-9220

*Nizhnekamsk Institute of Chemistry and Technology,
branch of Kazan National Research Technological
University (KNRTU), Nizhnekamsk, Russia*

Тихонова Диана Михайловна

студент

*Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «КНИТУ»,
Нижнекамск, Россия*

Tikhonova Diana Mikhailovna

student

*Nizhnekamsk Institute of Chemistry and Technology,
branch of Kazan National Research Technological
University (KNRTU), Nizhnekamsk, Russia*

Производство этилового спирта, применяемого в пищевой промышленности, непосредственно связано с процессом ректификации.

Приоритетным направлением совершенствования производственного процесса является повышение производительности ректификационных установок. Для достижения этой цели авторами разработано вихревое контактное устройство, представляющее собой цилиндрический патрубок, на котором выполнены вертикальные прорезы, проходя через которые паровой поток создает вихри, внутри которых образуются закрученные течения жидкости и газа.

Исследования проводились в CFD комплексе.

При проведении исследования изменялись технологические параметры контактного устройства и диаметр капель жидкости.

Результаты исследований показали, что задание вихрей цилиндрической формы посредством нахождения размера внутреннего диаметра корпуса вихревой контактной ступени по полученному в ходе исследований выражению позволит повысить эффективность осаждения капель жидкости более чем на 30 %, так же рекомендуется увеличивать ширину и высоту прорезей для создания надежной сепарации

The production of ethyl alcohol used in the food industry is directly related to the rectification process. The priority direction for improving the production process is to increase the productivity of rectification units. To achieve this goal, the authors have developed a vortex contact device, which is a cylindrical pipe with vertical slots, passing through which the steam flow creates vortices, inside which swirling flows of liquid and gas are formed. The studies were conducted in the CFD complex. During the study, the technological parameters of the contact device and the diameter of liquid drops were changed. The results of the studies showed that setting vortices of a cylindrical shape by finding the size of the internal diameter of the vortex contact stage body according to the expression obtained during the studies will increase the efficiency of liquid droplet sedimentation by more than 30%, it is also recommended to increase the width and height of the slots to create reliable separation

Ключевые слова: РЕКТИФИКАЦИЯ, ВИХРЕВОЕ КОНТАКТНОЕ УСТРОЙСТВО, ЭТИЛОВЫЙ

Keywords: RECTIFICATION, VORTEX CONTACT DEVICE, ETHYL ALCOHOL,

СПИРТ, СЕПАРАЦИЯ, УЛАВЛИВАНИЕ
КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИSEPARATION, CAPTURE OF LIQUID
DROPLETS<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-204-023>

Введение. Этиловый спирт получил широкое применение в пищевой промышленности. Он используется в производстве как алкогольных напитков, так и без алкогольных, таких как кефир, квас и напитки, получаемые в результате брожения. Так же этиловый спирт применяется в роли растворителя при производстве ароматизаторов, консервантов для хлебобулочных изделий, в пищевых добавках кондитерского производства. Повышение производительности ректификационных установок, которое, как правило, связано с заменой внутренних контактных устройств является приоритетным направлением развития производства, поскольку позволяет снизить энергозатраты, возникающие при эксплуатации установки, а также повысить качество выпускаемой продукции, что положительно сказывается на экономической составляющей производства.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Качественная сепарация газожидкостных потоков на контактных элементах тепло- и массообменных аппаратов имеет важное значение для повышения эффективности процессов, что в свою очередь требует разработки и внедрения контактных устройств с высокой пропускной способностью. Одними из них могут быть вихревые аппараты, работающие при высоких среднерасходных скоростях по газовой фазе. В таком случае возникает вероятность повышенного уноса жидкой фазы из рабочей зоны аппаратов. Это в свою очередь накладывает обязательства по эффективному конструктивному оформлению сепарационных зон контактных устройств массообменных аппаратов. В связи с этим в данной работе планируется исследовать эффективность сепарации при различном конструктивном оформлении вихревого контактного устройства.

<http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf/23.pdf>

Материалы и методы исследований. Авторами разработана конструкция многоступенчатой вихревой камеры [1] состоящей из корпуса 1 внутри которого располагаются ступени каждая из которых состоит из установленных на основание 3 цилиндрических патрубков 2, на стенках которых выполнены вертикальные прорезы 4. Поток входящего пара проходя через каждую прорезь образует в пространстве между корпусом и цилиндрическим патрубком два противоположно направленных вихря. Благодаря такой конструкции в кольцевом пространстве вихревой камеры посредством действия центробежных сил образуется зона взаимодействия закрученных течений жидкости и газа. Так как закручивание потоков происходит естественным образом при помощи вихрей, образующимся внутри контактного устройства, отпадает необходимость использования других закручивающих потоки устройств.

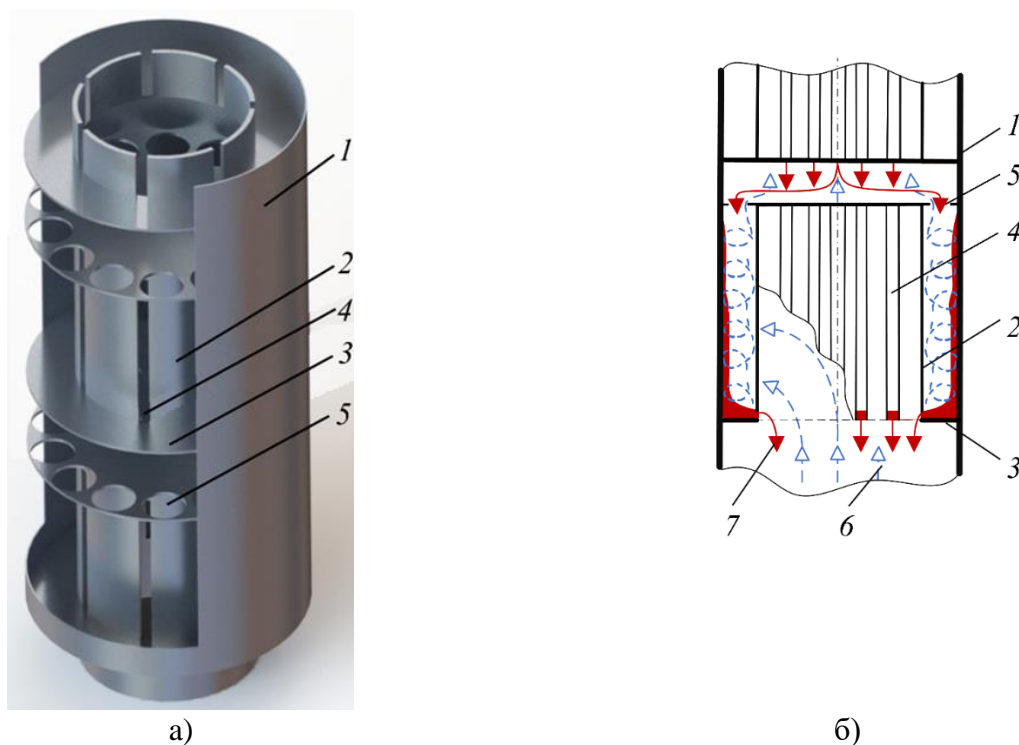


Рисунок 1 – Трехмерный вид с отображением внутренних элементов (а) и принцип работы многоступенчатого вихревого контактного устройства (б): 1 – корпус; 2 – цилиндрический патрубок; 3 – основание; 4 – вертикальные прорезы; 5 – отверстия для парового потока; 6 – паровой поток; 7 – поток жидкости.

Трехмерное изображение двух контактных ступеней многоступенчатой вихревой камеры показано на рисунке 1. Принцип работы данного устройства описывается следующим образом: входящий паровой поток 6 поступает во внутреннюю камеру цилиндрического патрубка 2, откуда проходя через каждую из вертикальных прорезей 4 равномерно разделяется на два противоположно направленных вихря которые заполняют кольцевое пространство и поднимаясь выше попадает через отверстия 5 в сепарационную зону, проходя через которую устремляется на вышележащую ступень. Параллельно с этим на верхнюю ступень подается поток исходной водно-спиртовой смеси 7, которая, попадая на основание 3, проходит через вертикальные прорези 4 и стекает в сепарационную зону нижерасположенной ступени, где, сталкиваясь с поднимающимся потоком пара 6, разбивается на отдельные мелкие капли и струи. Поскольку поток поднимающегося пара имеет закрученную структуру данные капли под действием центробежных сил отбрасываются к стенкам и внутренним поверхностям 1 вихревой контактной ступени, образуя на поверхности пленочное течение жидкости. При этом по всей высоте вихревой ступени можно наблюдать как под действием закрученного потока восходящего пара из пленочного течения отделяются капли жидкости образуя закрученное газожидкостное течение. Такое взаимодействие фаз показывает высокую степень тепломассопередачи.

Целью численных исследований при моделировании процесса сепарации газожидкостного потока внутри вихревой камеры являлось определение эффективности улавливания капель жидкости посредством осаждения их на пленке, стекающей по внутренним поверхностям кольцевого пространства вихревого контактного устройства. При создании трехмерной модели вихревой контактной ступени принимались следующие параметры: высота ступени – 130 мм из которых 40 мм высота сепарационной зоны и 90 мм высота кольцевого пространства. Наружный

диаметр цилиндрического патрубка принимался равным 53 мм, на поверхности которого выполнены 6 равноудаленных друг от друга вертикальных прорезей. Стоит отметить, что каждая прорезь, выполненная в цилиндрическом патрубке, образует собой два разнонаправленных вихря. В ходе численных исследований изменялись ширина прорезей от 2 до 4 мм, а высота – от 45 до 85 мм.

В ходе исследований получено выражение для расчета диаметра корпуса вихревой контактной ступени с учетом образования вихрей правильной цилиндрической формы:

$$D_n = D_{вн} \frac{1 + \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}, \quad (1)$$

где D_n – внутренний диаметр корпуса вихревой камеры, м; $D_{вн}$ – наружный диаметр цилиндрического патрубка, м; n – количество образующихся в поперечном сечении устройства вихрей.

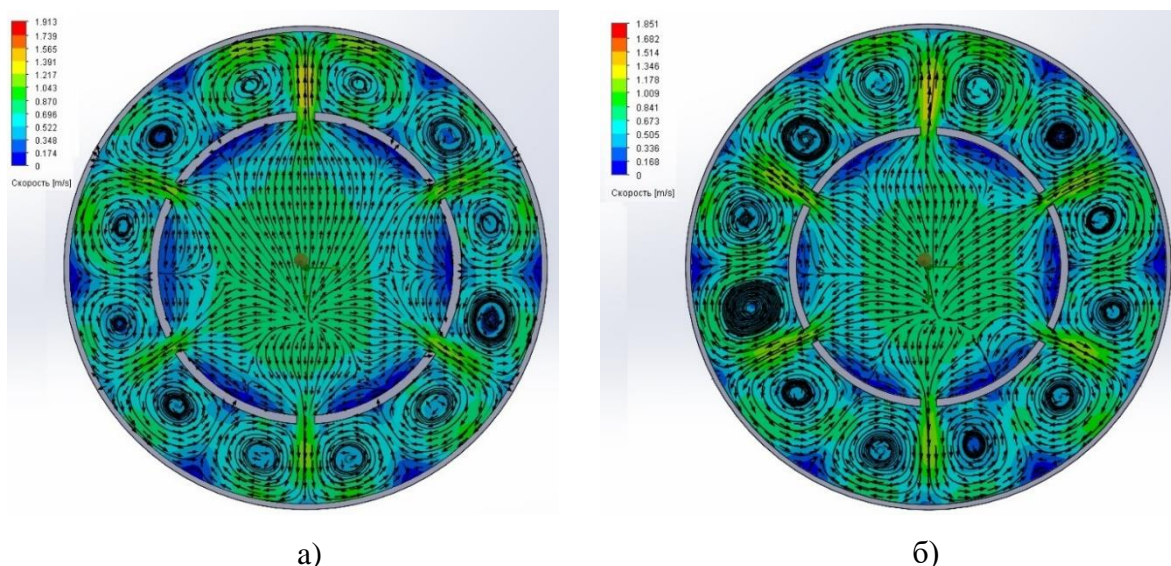


Рисунок 2 – Профили скоростей газа на выходе из цилиндрического патрубка с отверстиями размером 3x85 мм при внутреннем диаметре корпуса вихревой контактной ступени D_n , мм: а) – 83; б) – 90.

Проведенные численные исследования на вихревой контактной

ступени с внутренним диаметром корпуса равным 83 мм, и внутренним диаметром корпуса равным 90 мм полученного на основе выражения (1) показывают, что вихри правильной цилиндрической формы обладают, как правило, более высокой сепарационной эффективностью (рис. 2).

Исследования проводились посредством моделирования в CFD комплексе однофазного потока газа, в котором присутствуют капли воды в виде дисперсных частиц. В качестве несущей среды был принят паровой поток при температуре 20°C, скорость которого на входе в вихревую контактную ступень достигала 1 м/с. Для определения эффективности улавливания капель жидкости на внутренних поверхностях контактного устройства ставилось условие прилипания. В процессе исследования диаметры капель жидкости варьировались от 0,05 до 0,5 мм.

При работе вихревого контактного устройства может наблюдаться унос капель жидкости на вышерасположенную ступень посредством их срыва из закрученного течения образуемого вихрями в кольцевом пространстве. Поскольку это явление может происходить всей высоте ступени, в том числе и сепарационной зоне, при расчетах высота срыва принималась в диапазоне от 40 до 120 мм от основания ступени. Дисперсные частицы, общим количеством 1000 штук, равномерно располагались внутри кольцевого пространства на различных окружных диаметрах.

Эффективность сепарации вихревого контактного устройства можно определить по выражению (1) как процентное отношение количества унесенных на следующую ступень частиц к их общему количеству.

$$E = 1 - \frac{N}{N_0}, \quad (2)$$

где N_0 – общее количество дисперсных частиц; N – количество частиц, унесенных на верхнюю ступень.

Результаты исследований. Графики на рисунке 3 демонстрируют

влияние безразмерного параметра h_i/H (где h_i – текущая высота срыва капель, H – общая высота контактной ступени) на эффективность осаждения капель жидкости различных диаметров на вихревой ступени при среднерасходной скорости пара $W_{cp} = 1$ м/с, ширине и высоте прорезей равной 3 и 85 мм соответственно. При сравнении показателей эффективности вихревых контактных ступеней с внутренними диаметрами корпуса равными 83 мм и 90 мм, видно, что создание вихрей правильной цилиндрической формы вызывает повышение показателей сепарации контактного устройства. Так в контактной ступени с внутренним диаметром корпуса равным 83 мм капли диаметром 0,2 мм, расположенные на высоте 100 мм улавливаются с эффективностью 68,6%, в то время как в контактной ступени с внутренним диаметром корпуса равным 90 мм этот показатель достигает 99,6%. Но при этом наблюдается незначительное снижение сепарационных показателей для капель диаметром 0,05 мм и 0,1 мм расположенных на расстоянии выше 100 мм от основания ступени.

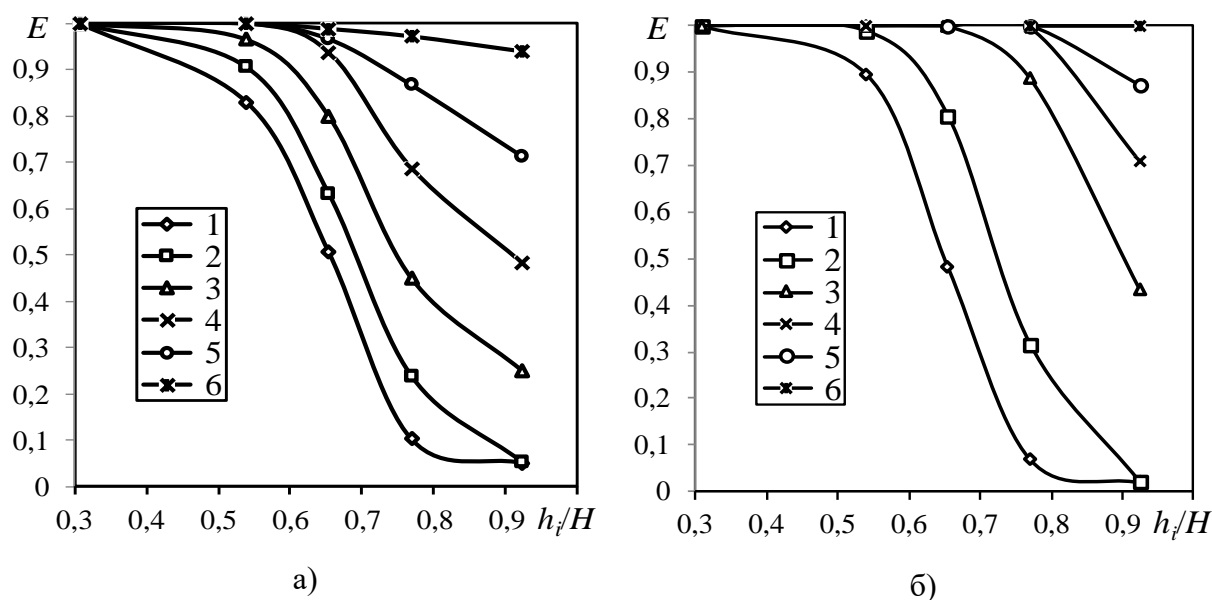


Рисунок 3 – Зависимость эффективности осаждения капель жидкости на вихревой ступени от безразмерного параметра h_i/H при различных диаметрах капель a , мм: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,25; 6 – 0,5. Внутренний диаметр корпуса вихревой контактной ступени D_n , мм: а) – 83; б) – 90.

Дальнейшие исследовано влияние ширины прорезей на эффективность сепарации капель жидкости показало, что в вихревой контактной ступени с внутренним диаметром корпуса равным 90 мм этот показатель выше, чем у устройства с внутренним диаметром равным 83 мм. Это объясняется тем, что благодаря созданию вихрей цилиндрической формы изменяется структура потока газа при переходе от контактной зоны к сепарационной (на расстоянии 90 мм от основания контактной ступени). На рисунке 4 видно, что в обоих случаях при начальном местоположении капель до 87–94 мм от основания контактной ступени эффективность их осаждения повышается с увеличением ширины прорезей при среднерасходной скорости пара 1 м/с, но после попадания в сепарационную зону, расположенную выше 100 мм начинает снижаться. В этой зоне наблюдается наибольшая эффективность сепарации у устройств с небольшой шириной прорезей.

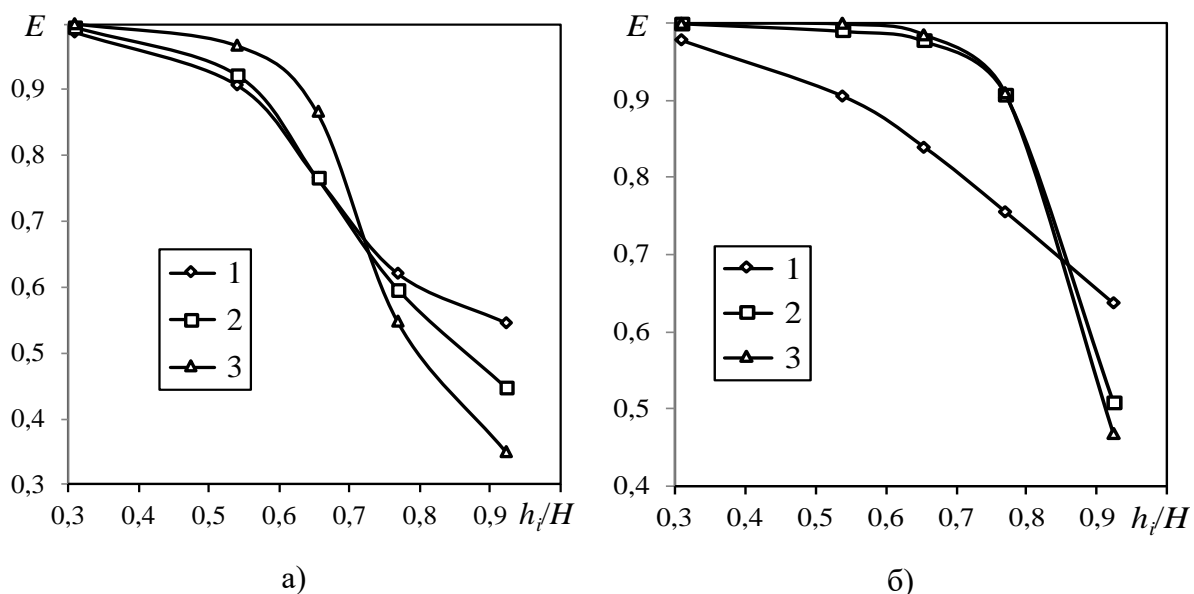


Рисунок 4 – Зависимость эффективности осаждения капель жидкости на вихревой ступени от безразмерного параметра h_i/H при различной ширине прорезей b , мм: 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4. Диаметры капель 0,15 мм. Среднерасходная скорость пара $W_{cp} = 1$ м/с. Внутренний диаметр корпуса вихревой контактной ступени D_n , мм: а) – 83; б) – 90.

Увеличение высоты прорезей приводит так же к повышению эффективности осаждения капель жидкости на вихревой ступени. Аналогично предыдущему исследованию у устройства с внутренним диаметром корпуса равным 90 мм наблюдается заметный прирост эффективности сепарации по отношению к устройству с внутренним диаметром равным 83 мм (рис. 5). Повышение эффективности осаждения капель жидкости при увеличении высоты прорезей связано с тем, что при наибольшей высоте прорезей наблюдается более стабильная вихревая структура с высокой интенсивностью крутки по всей высоте контактной зоны предлагаемого устройства.

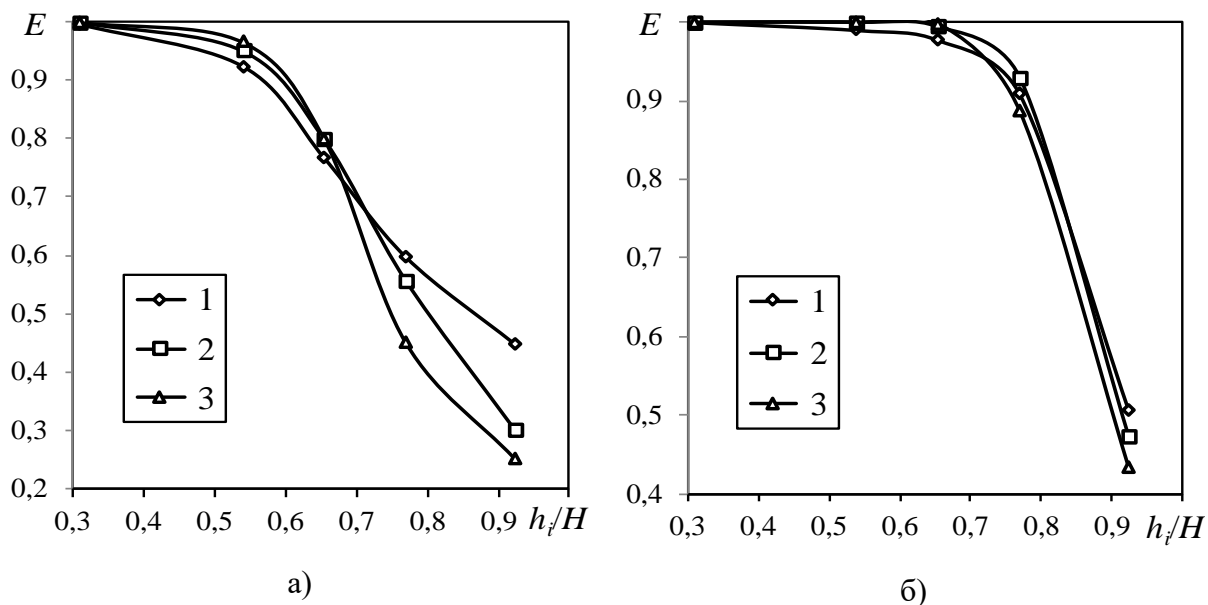


Рисунок 5 – Зависимость эффективности осаждения капель жидкости на вихревой ступени от безразмерного параметра h_i/H при различной высоте прорезей h , мм: 1 – 45; 2 – 65; 3 – 85. Диаметры капель 0,15 мм. Среднерасходная скорость пара $W_{cp} = 1$ м/с. Внутренний диаметр корпуса вихревой контактной ступени D_n , мм: а) – 83; б) – 90.

Выводы. Результаты исследований показывают, что задание вихрей правильной цилиндрической формы посредством нахождения оптимального размера внутреннего диаметра корпуса вихревой контактной

ступени положительным образом отражается на эффективности сепарации. Результаты проведенных численных исследований для капель жидкости диаметром 0,15 мм расположенных на расстоянии 100 мм от основания контактной ступени показывают, что при входящем паровом потоке со скоростью 1 м/с устройства с размерами прорезей 3x85 мм и внутренними диаметрами корпусов равными 83 мм и 90 мм достигают эффективности улавливания 59,6% и 90,8% соответственно. В обоих рассматриваемых случаях для повышения эффективности осаждения капель жидкости на вихревой контактной ступени рекомендуется увеличивать ширину и высоту прорезей для создания надежной сепарации. При наличии капель жидкости диаметром 0,1 мм в сепарационной зоне вихревой контактной ступени может наблюдаться унос жидкой фазы.

Библиографический список

1. Madyshev, I.N., Dmitrieva, O.S., Kharkov, V.V., Mayasova, A.O.: Determining hydraulic resistance and volumetric heat and mass transfer coefficients during cooling of circulating water in a multistage vortex chamber. *Therm. Eng.* 69, 963–970 (2022). DOI10.1134/S0040601522110039

References

1. Madyshev, I.N., Dmitrieva, O.S., Kharkov, V.V., Mayasova, A.O.: Determining hydraulic resistance and volumetric heat and mass transfer coefficients during cooling of circulating water in a multistage vortex chamber. *Therm. Eng.* 69, 963–970 (2022). DOI10.1134/S0040601522110039