

13. Temara A., Ledent G., Warnau M., Paucot H., Jangoux M. Experimental cadmium contamination of *Asterias rubens* (Echinodermata) // Marine Ecology Progress Series. 1996. Vol. 140, P. 83 – 90.
14. Temara A. et al. Factors influencing the concentrations of heavy metals in the asteroid *Asterias rubens* L. (Echinodermata) // Marine Ecology Progress Series. 1997. Vol. 203. P. 51– 63.
15. Zar J.H. Biostatistical Analysis, 3rd ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 1996.
16. Zorita I. et al., Assessment of biological effects of environmental pollution along the NW Mediterranean Sea using mussels as sentinel organisms // Environmental pollution. 2007. Vol. 148 (1). P. 236 – 50.
17. Бакиров А.Б. Научные разработки ФГУН УфНИИ медицины труда и экологии человека в нефтяной промышленности // Нефть и здоровье: сборник научных трудов Всероссийской конференции Уфа, 2009. - С. 18 – 25.
18. Козлова А.Б., Петухова О.А., Пинаев Г.П. Анализ клеточных элементов целомической жидкости на ранних сроках регенерации морской звезды *Asterias rubens* L // Цитология. 2006. 48(3). С.175 – 183.

Влияние скорости на эффективность сепарации капель при частичной конденсации пара на трубном пучке

К.т.н. доц. Жихарев А.С., Мантрова Ю.С.
Университет машиностроения
a_giharev@msuie.ru

Аннотация. Рассмотрен процесс улавливания взвешенных в паровой фазе капель и влияние на различных факторов на его эффективность.

Ключевые слова: конденсация пара; трубные сепараторы, конденсационная сепарация пара

Одним из способов повышения эффективности улавливания взвешенных в паре капель является использование эффекта конденсации пара. Наиболее перспективным представляется осуществление процесса конденсации с целью осаждения капель на поверхности трубного пучка.

Конденсационная сепарация пара является сложным процессом, зависящим от ряда физических и конструктивных факторов. В случае продольного обтекания паром вертикального трубного пучка капли, находящиеся в нем, перемещаются к поверхности конденсации под воздействием конденсирующейся части пара, а также под воздействием термодиффузиофореза и стефановского течения. Капли, которые достигли поверхности конденсации, осаждаются на ней. Оставшаяся часть капель выносятся из аппарата. Вблизи поверхности раздела фаз может происходить конденсационное укрупнение капель, что способствует их осаждению. При поперечном движении пара относительно пучка труб существенный вклад в развитие процесса осаждения капель могут дать также силы инерции, возникающие вследствие отклонения линий тока у поверхности трубок. В случае, когда движение пара осуществляется вдоль вертикальной поверхности трубки, на которой пар частично конденсируется, силы тяжести и инерции, по всей вероятности, не будут определять процесс осаждения капель на поверхность конденсации, в связи с чем их можно не учитывать для рассмотренных условий.

При поперечном движении пара относительно трубного пучка на взвешенную каплю будут действовать те же силы, что и в случае продольного движения пара: сила динамического воздействия пара, сила сопротивления, сила тяжести, сила инерции, сила термофореза, сила диффузиофореза и стефановская сила [1]. Однако действие этих сил будет носить несколько иной характер. Взвешенная капля двигается к поверхности конденсации, увлекаемая потоком пара. На некотором расстоянии от поверхности линии тока огибают трубку и тогда капля под действием силы инерции и потока пара, направленного к поверхности трубки

(конденсирующийся пар), попадает в пристенный слой и осаждается на поверхности конденсации за счет сил термодиффузиофореза и стефановского течения. Когда же динамического воздействия пара в направлении поверхности конденсации и силы инерции оказывается недостаточно для вовлечения капли в пристенный слой, она огибает поверхность трубки, устремляется к трубкам следующего ряда или же выносится из аппарата. Сила тяжести при этом, очевидно, не будет оказывать существенного влияния на интенсивность осаждения капель ввиду того, что она направлена перпендикулярно как направлению движения пара, так и поверхности конденсации (осаждения).

К основным параметрам, определяющим процесс конденсационной сепарации пара на трубном пучке, следует отнести степень конденсации пара. От величины степени конденсации зависит интенсивность воздействия конденсирующегося пара на взвешенные капли в ядре потока, а также величина сил термодиффузиофореза и стефановского течения в непосредственной близости от поверхности конденсации. На процесс осаждения капель в описанных условиях оказывают также влияние величина поверхности конденсации и размер капель.

Анализ уравнения движения капли под действием данных сил с использованием методов теории подобия позволил получить совокупность критерия подобия [1, 2].

Экспериментальное изучение влияния на унос C скорости пара W'' осуществлялось на однетрубном и многотрубных сепарирующих элементах. Опыты проводились при давлении пара 0,1; 0,05 и 0,025 МПа с изменением степени конденсации N от 0,16 до 0,23.

На рисунке 1 представлена зависимость уноса C от приведенной скорости пара W'' для прямого тока, когда пар и конденсат, образующийся на поверхности вертикальной трубки, движутся в одном направлении, сверху вниз, при $l=4,5$ м, $N=0,158 - 0,173$. Полученные зависимости отражают влияние скорости W'' на эффективность сепарации при различных давлениях пара. Как видно из рисунка 1 унос увеличивается по линейному закону с повышением скорости пара для всех трех значений давления. Объясняется это тем, что с возрастанием величины W'' изменяется соотношение сечений потока, занимаемых турбулентным ядром и пристенным слоем.

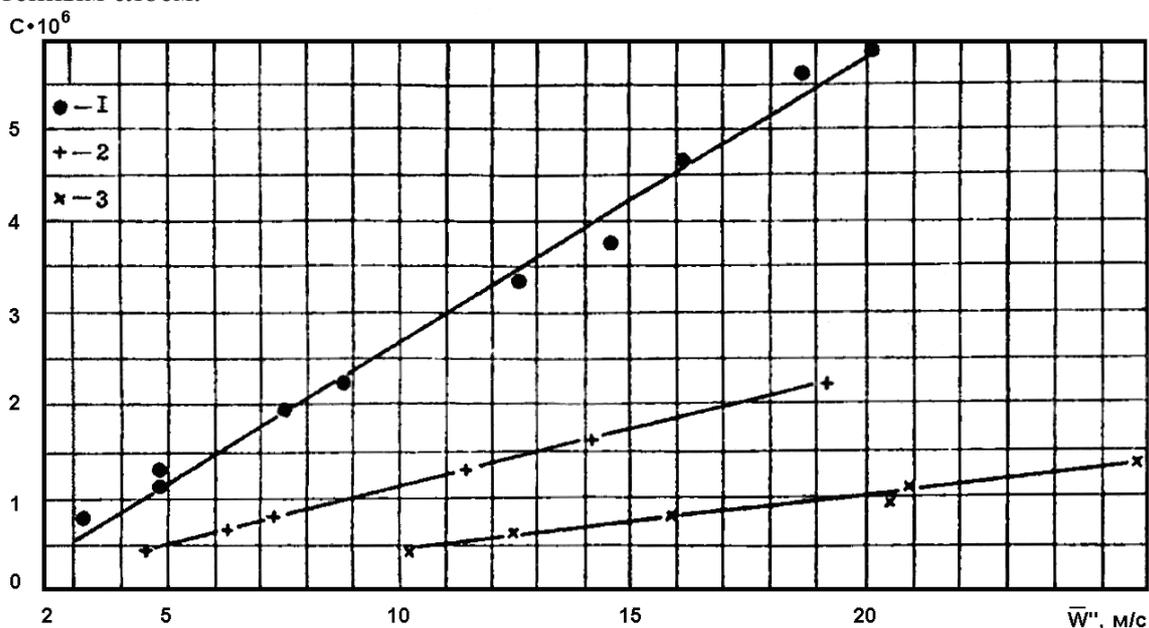


Рисунок 1. Зависимость уноса C от скорости пара W'' в режиме прямого тока:
1 – $P = 0,1$ МПа; 2 – $P = 0,05$ МПа; 3 – $P = 0,025$ МПа

Увеличивается доля сечения канала в центральной его части, где имеют место наиболее высокие скорости пара, и уменьшается толщина пристенного слоя, где скорость пара резко падает по мере приближения к стенке. Условия для осаждения капель, находящихся в при-

стенном слое, более благоприятны за счет снижения скорости пара, чем для капель, находящихся в ядре потока. Поэтому увеличение скорости пара W'' приводит к тому, что все меньшее число взвешенных капель достигают пристенного слоя и осаждаются на поверхности трубки за время пребывания в элементе. Визуальные наблюдения позволили установить, что при превышении скорости пара $W'' > (15 - 20)$ м/с происходил срыв капель с поверхности пленки конденсата, образующегося на трубке элемента.

В области малых скоростей $W'' < (15 - 20)$ м/с и при более высоких скоростях пара в элементе причины, вызывающие увеличение уноса с повышением скорости W'' , различны. В первой области унос увеличивается за счет сокращения количества капель, осаждающихся на поверхности конденсации в сепарирующем элементе, а во второй – к тому же добавляется срыв и унос капель с поверхности конденсата, стекающего по трубке элемента. При переходе к $W'' > (15 - 20)$ м/с характер зависимости не изменяется, очевидно, из-за постепенного нарастания вторичного уноса конденсата из элементов с повышением скорости пара W'' .

Из полученного графика (см. рисунок 1) видно, что влияние скорости пара W на унос ослабляется с понижением давления. Причиной тому служит изменение плотности пара. Срыв капель с поверхности трубки элемента визуально наблюдался, когда скорость пара W'' достигала 18 – 20 м/с, при $P = 0,025 - 0,05$ МПа, а при атмосферном давлении пара вторичный унос происходил уже при $W'' = 15 - 16$ м/с. Увеличение критической скорости пара с понижением давления обусловлено изменением плотности пара.

В отличие от режима прямотока зависимость для противотока имеет две отчетливо выраженные области влияния скорости пара на унос. В первой области с увеличением скорости пара W'' наблюдается незначительное повышение уноса C , а во второй – унос резко увеличивается по мере нарастания величины W'' . Как при прямотоке, так и в режиме противотока визуально наблюдался срыв и унос капель конденсата с поверхности трубки элемента, когда скорость пара W'' превышала 15 – 20 м/с. Однако вторичный унос повышался более интенсивно с увеличением W'' , чем в режиме прямотока [3, 4, 5]. Обусловлено это различием относительного движения пара и конденсата в сепарирующем элементе. В первом случае пар и конденсат двигаются в одном направлении (сверху вниз), а при противотоке пар устремляется снизу вверх, навстречу стекающему по трубке конденсату.

Очевидно, что при одном и том же значении скорости пара относительно стекающей пленки конденсата составляет большую величину при противотоке. Различный наклон кривых отражает ослабление влияния скорости на унос с понижением давления пара. Причиной этого является, так же как и в случае прямотока, уменьшение плотности пара с понижением давления.

Изучение влияния скорости пара на эффективность сепарации в режиме поперечного тока показало, что при увеличении скорости пара до некоторой величины унос уменьшается, а дальнейшее возрастание скорости W'' приводит к резкому повышению уноса C . Наличием инерционного фактора в режиме поперечного тока, усиливающегося по мере повышения скорости пара W'' , обусловлена обратно пропорциональная связь между уносом и скоростью пара в первой области функциональной зависимости.

В момент огибания паром трубки элемента взвешенные капли под действием сил инерции продолжают двигаться к ее поверхности, и, попадая в пристенный слой, осаждаются на пленку конденсата, стекающего по трубке элемента. Таким образом, до начала вторичного уноса повышение скорости W'' способствует повышению эффективности процесса сепарации. Точки перегиба [3, 4] соответствуют началу вторичного уноса при различных давлениях пара.

Эти точки располагаются в диапазоне от 10 до 13 м/с, что несколько меньше значений критической скорости для прямо- и противотока (15 – 20 м/с). Величина критической скорости зависит от характера относительного движения паровой и жидкой фаз в сепарирующих элементах.

Начало срыва капель с поверхности жидкости при перекрестном течении жидкости и

газа происходит при скорости газа в 1,2 раза меньшей, чем в случае вертикального встречного движения фаз, с соблюдением равенства прочих условий.

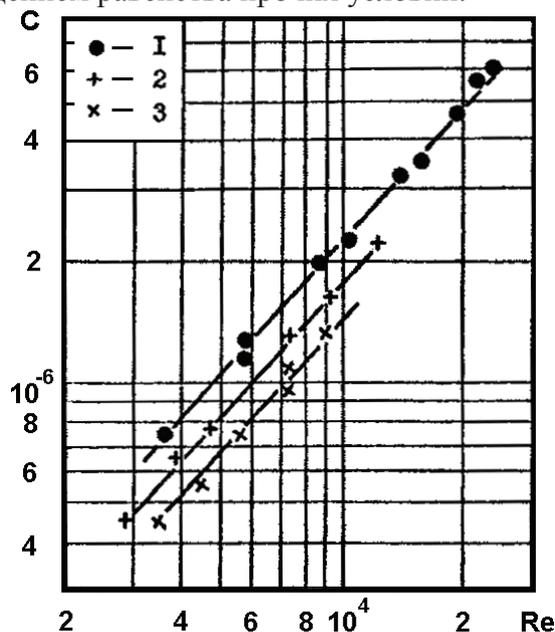


Рисунок 2. Зависимость уноса C от числа Re в режиме прямого тока ($l = 4,5$ м; $N = 0,158 - 0,173$): 1 — $P = 0,1$ МПа; 2 — $P = 0,05$ МПа; 3 — $P = 0,025$ МПа

Унос в этом случае зависит в основном от интенсивности осаждения капель, а срыв капель с поверхности конденсатной пленки играет незначительную роль в общей массе уноса, или же вовсе отсутствует. Интенсивность осаждения частиц, в данном случае, определяется процессами термодиффузиофореза, происходящими в пристенной области. С повышением давления пара увеличивается его плотность при незначительном изменении остальных физических свойств (вязкости и теплопроводности), в связи с чем скорость термодиффузиофореза снижается. Кроме того повышение плотности пара влечет за собой снижение скорости пара W при $pW = \text{const}$. Для режима поперечного тока снижение скорости пара приводит к уменьшению сил инерции, способствующих осаждению капель. Таким образом, объясняется влияние давления пара на унос C при значениях pW , не превышающих $5,1 \text{ кг/м}^2\text{с}$ — для всех исследованных режимов конденсационной сепарации пара на трубном пучке. При более высокой скорости пара ($pW = 5,1 - 7,1 \text{ кг/м}^2\text{с}$) унос C определяется в большей степени не интенсивностью осаждения капель на конденсатную пленку, образующуюся на трубках сепарирующих элементов в результате частичной конденсации пара, а количеством жидкости, унесенной с поверхности пленки конденсата, обогащенного солью. По мере возрастания скорости пара W в сепарирующих элементах все значительнее проявляется вторичный унос капель (см. рисунок 2). При этих условиях связь между давлением пара P и уносом C приобретает обратно пропорциональную зависимость. С понижением давления пара уменьшается его плотность p и возрастает скорость W . Динамический напор пара $(pW^2)/2$ взаимодействующего с пленкой конденсата, от величины которого зависит количество унесенной жидкости, пропорционален квадрату скорости W^2 , а плотность пара входит в уравнение динамического напора лишь в первой степени. Следовательно, определяющим фактором формирования величины уноса C , в данных условиях, будет скорость пара, увеличивающаяся по мере снижения давления пара, что и является причиной возрастания уноса C при $pW = (5,1 - 7) \text{ кг/м}^2\text{с}$.

Литература

1. Костенко Г.С., Кутепов А.М., Жихарев А.С. Исследование сепарации вторичных паров методом частичной конденсации в режиме поперечного тока // Журнал прикладной химии,

№8, 1982, Т.55, с. 1780.

2. Костенко Г.С., Кутепов А.М., Жихарев А.С., Касьяненко М.К. Исследование сепарации вторичных паров методом частичной конденсации при продольном обтекании одиночного элемента//Журнал прикладной химии,1982. №8, с. 1801.
3. Жихарев А.С. Сепарация пара методом частичной конденсации на трубном пучке//Известия МГТУ «МАМИ» №3(17), 2013, т.2, с. 69 – 73.
4. Жихарев А.С., Черепанова О.А. Расчёт эффективности улавливания капель в осевых центробежных сепараторах с лопастными завихрителями//Известия МГТУ «МАМИ» №1(15), 2013, т. 4, с. 86-89.
5. Жихарев А.С. Расчет уноса капель при сепарации пара методом частичной конденсации на трубном пучке при минимальной степени конденсации// Известия МГТУ «МАМИ» №1(19), 2014, т.3, с. 18 – 23.

Рабочие тела высокотемпературных тепловых насосов. Современное состояние вопроса и направления развития

Малафеев И.И., Ильин Г.А., к.т.н. доц. Крысанов К.С.

*Университет машиностроения
8 (495) 223-05-23, malafeev_ilya@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены рабочие вещества, отвечающие требованиям для использования в пароконденсационных высокотемпературных тепловых насосах, работающих по обратному термодинамическому циклу. Выполнено сопоставление термодинамической эффективности рабочих веществ в диапазоне температур работы одноступенчатого теплонасосного дистиллятора.

Ключевые слова: рабочее вещество низкого давления, высокотемпературный тепловой насос, теплонасосный дистиллятор

Энергосбережение – одна из основных проблем, решаемых мировым сообществом в настоящее время. Усилия в этом направлении сосредоточены на двух целях: сохранение невозобновляемых энергоресурсов и сокращение вредных выбросов в атмосферу продуктов сгорания, являющихся основным фактором глобального потепления. Развитие альтернативной энергетики, в частности использование источников низкопотенциального тепла в сочетании с тепловыми насосами (ТН), направлено на рациональное использование энергетических ресурсов и снижение деструктивного антропогенного воздействия на природную среду.

Теплонасосные установки (ТНУ), осуществляя обратный термодинамический цикл на низкокипящем рабочем веществе, утилизируют низкопотенциальную теплоту естественных, промышленных и бытовых источников, генерируют теплоту высокого потенциала, затрачивая при этом в пределе до 2,5 раз меньше первичной энергии, чем при прямом сжигании топлива. ТН находят все большее применение в системах теплоснабжения жилых и производственных зданий, в качестве установок обеспечения тепловой энергией нужного потенциала ряда технологических процессов (сушка, дистилляция, тепловая обработка), в системах утилизации тепла промышленных предприятий и энергетических комплексов, включая АЭС, а также в системах коге- и тригенерационных установках для выработки электроэнергии, тепла и холода.

Применение рабочих веществ с наиболее благоприятными термодинамическими свойствами имеет первостепенное значение для создания высокоэффективных ТН. Термодинамические циклы холодильных машин и ТН основаны главным образом на фазовых превращениях рабочих веществ. В компрессионных машинах образующийся в испарителе пар при низком давлении нагнетается компрессором в конденсатор (газоохладитель) для передачи теплоты цикла потребителю.