

Расчет уноса капель при сепарации пара методом частичной конденсации на трубном пучке при минимальной степени конденсации

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

Аннотация. Рассмотрена физическая модель процесса сепарации пара методом частичной конденсации на трубном пучке, приведена методика расчёта конденсационного трубчатого сепаратора.

Ключевые слова: конденсационная сепарация пара, каплеунос, трубный пучок.

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 поверхность 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 выносятся 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, 3].

Так как движение дисперсной жидкой фазы определяется в основном вынужденным движением пара, то изменение критерия Фруда будет оказывать незначительное влияние на процесс сепарации.

Полученное уравнение [1, 2, 3] было использовано для получения обобщенной зависимости величины уноса капель из конденсационного сепаратора. Окончательно получаем

$$C = f\left(\text{Re}, N, \text{Kp}, \frac{l}{l'}\right), \quad (1)$$

где l – расстояние, пройденное паром вдоль поверхности конденсации, м; l' – характерный размер трубного пучка, м;

Сепарация пара методом частичной конденсации на трубном пучке наиболее рациональна для очистки вторичных паров выпарных аппаратов от капель упариваемого раствора. Схемы многокорпусных выпарных установок предусматривают кожухотрубчатые подогреватели исходного раствора, обогрев которых происходит за счет конденсации определенной части вторичных паров, отбираемых из выпарных аппаратов. Это позволяет осуществлять конденсационную сепарацию пара в межтрубном пространстве подогревателей и использовать тепло частичной конденсации в технологическом процессе.

Конденсационные сепараторы эффективно улавливают мелкие капли диаметром до 1 мкм, в связи с чем их рекомендуется устанавливать на линии вторичного пара после инерционных или центробежных сепарационных устройств, в которых осаждаются более крупные капли [4]. Кроме выпарных установок, конденсационные трубчатые сепараторы могут использоваться и в составе с другими аппаратами, отходящие пары которых содержат мелкие капли.

Исследования влияния степени конденсации пара N на эффективность процесса сепарации проводились на однетрубном и многотрубном сепарирующих элементах, под атмосферным давлением, при различных значениях скорости пара $\bar{W}'' = 3,1 - 12,8$ м/с.

Зависимость уноса C от степени конденсации пара N , полученная в результате исследований, представлена на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что зависимость $C = F(N)$ состоит из двух областей, влияние степени конденсации N на унос C в которых различно. Увеличение степени конденсации до 0,23 вызывает резкое снижение уноса. При дальнейшем повышении степени конденсации пара наблюдалось незначительное снижение уноса. Характер зависимости $C = F(N)$ объясняется тем, что по мере повышения степени конденсации увеличивается поток пара, направленный к охлаждаемой поверхности трубки. Это способствует выносу все большего количества капель из ядра потока в пристенный слой, где они под действием сил термодиффузиофореза и стефановского течения приобретают движение, ориентированное в сторону поверхности конденсации, и, достигая ее, капли выпадают в пленку конденсата, который затем выводится из элемента. Процесс тепломассообмена при конденсации пара на поверхности определяется разностью температур пара и поверхности конденсации. Чем ниже температура поверхности конденсации, тем больше пара конденсируется на ней, при прочих равных условиях. Очевидно, возрастание степени конденсации сопровождается и увеличением перепада температур в пристенном слое, у поверхности фазового перехода, в результате чего усиливается действие сил термофореза на капли в этой зоне. Кроме того, с увеличением степени конденсации возрастает приток неконденсирующихся газов к поверхности фазового перехода, увеличивая неравномерность концентрации пара в пристенном слое, что, в свою очередь, приводит к усилению действия на капли диффузиофореза [1, 2, 3].

Капли раствора, содержащиеся в паре, двигаясь из ядра потока к поверхности конденсации, попадают в тепловой пограничный слой, где охлаждаются, в результате чего появляются условия для их конденсационного укрупнения.

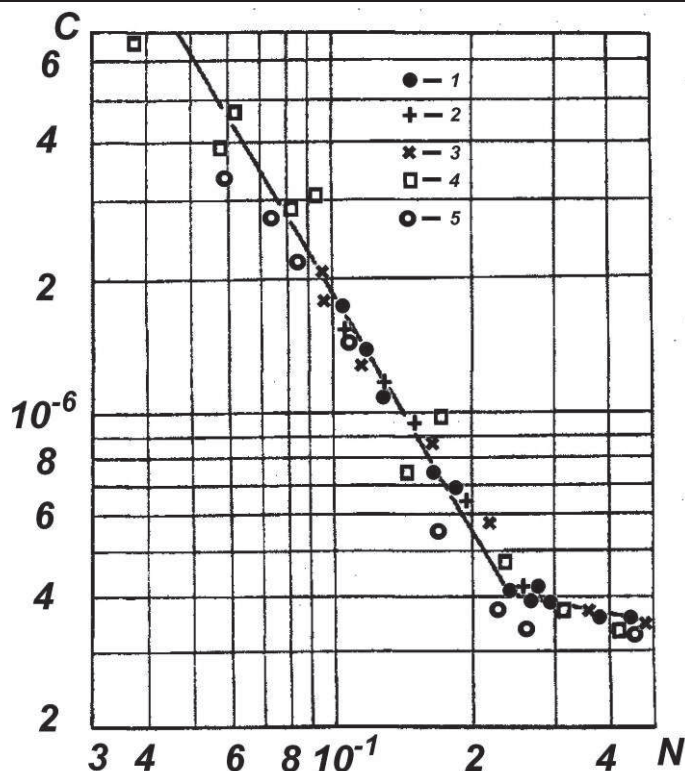


Рисунок 1. Зависимость уноса C от степени конденсации N : 1 – прямоток, $\bar{W}'' = 3,1 \div 3,7$ м/с; 2, 3 - противоток; 2 – $\bar{W}'' = 3,24 \div 4,4$ м/с; 3 – $\bar{W}'' = 11,3 \div 12,25$ м/с; 4, 5 – поперечный ток; 4 – $\bar{W}'' = 6,28 \div 7,3$ м/с; 5 – $\bar{W}'' = 11,5 \div 12,77$ м/с

Таким образом, рост степени конденсации пара вызывает усиление всех факторов, способствующих конденсационному осаждению капель в сепарирующих элементах, чем и объясняется резкое снижение уноса C с увеличением степени конденсации N для первой области зависимости $C = F(N)$. Во второй области этой зависимости величина степени конденсации оказывает меньшее влияние на унос потому, что большинство капель, по-видимому, выпадает при $N < 0,23$, а при $N > 0,23$ концентрация капель в паре, размер которых позволяет эффективно осаждавать их под действием конденсационных факторов ($d_k > 0,5 - 1$ мкм), понижается, из-за чего уменьшается вероятность выпадения капель в сепарирующем элементе.

Согласно рассмотренной физической модели процесса сепарации, существует значение N , превышение которого незначительно отражается на величине уноса C . Как следует из графика (рисунок 1), это значение величины степени конденсации пара N находится в диапазоне $0,16 \leq N \leq 0,23$ [1, 2].

Влияние скорости пара \bar{W}'' на эффективность сепарации в режиме поперечного тока отражает зависимость, представленную на рисунке 2, из которого видно, что при увеличении скорости пара до некоторой величины унос уменьшается, а дальнейшее возрастание скорости \bar{W}'' приводит к резкому повышению уноса C . Наличием инерционного фактора в режиме поперечного тока, усиливающегося по мере повышения скорости пара \bar{W}'' , обусловлена обратно пропорциональная связь между C и \bar{W}'' в первой области функциональной зависимости $C = F(\bar{W}'')$.

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 \bar{W}'' способствует повышению эффективности процесса сепарации. Точки перегиба на графике (рисунок 2) соответствуют началу вторичного уноса при различных давлениях пара [1, 2].

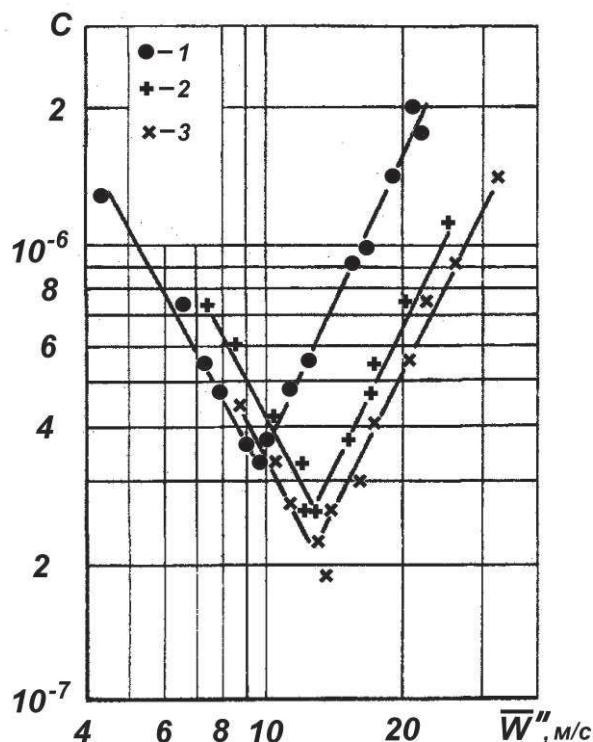


Рисунок 2. Зависимость уноса C от скорости пара \bar{W}'' в режиме поперечного тока:
 $N = 15$; $N = 0,157 \div 0,172$; 1 - $P = 0,1$ МПа; 2 - $P = 0,05$ МПа; 3 - $P = 0,025$ МПа

Задача инженерного расчета конденсационного трубчатого сепаратора состоит в определении режимных параметров работы сепаратора (выбор схемы относительного движения пара в трубном пучке, расчет скорости пара W'' , нахождение величины уноса C) и его конструктивных размеров (размеры трубок трубчатого пучка, шаг трубного пучка, количество трубок), обеспечивающих минимальный унос при минимальной или заданной степени конденсации.

Методика расчета сепаратора основана на определении режима сепарации, обеспечивающего минимальный унос при заданных геометрических параметрах трубного пучка и минимальной степени конденсации.

Для расчета сепаратора необходимо знать расход сепарируемого пара G , а также величину давления пара P , степень конденсации N , плотность жидкой и паровой фаз ρ' , ρ'' , вязкость пара и поверхностное натяжение жидкой фазы. Кроме того, необходимы данные о конструкции трубного пучка: диаметр d , длина ℓ и число трубок $n_{\text{тр}}$, шероховатость труб и диаметр кожуха $D_{\text{к}}$, которые находятся из предварительного расчета по заданной тепловой нагрузке и расходу подогреваемого раствора.

Наименьший унос при конденсационной сепарации пара на трубном пучке можно получить в режиме поперечного тока при $\bar{W}'' = 10 - 14$ м/с.

В состав исходных данных для расчета сепаратора должны входить следующие величины: расход пара $G_{\text{п}}$ и его давление P , плотность жидкой и паровой фаз ρ' , ρ'' , вязкость пара μ'' , поверхностное натяжение жидкой фазы σ , температура пара $t_{\text{п}}$, теплота конденсации пара r , начальная температура t_1 и теплоемкость $C_{\text{в}}$ охлаждающей воды.

Порядок расчета:

Принимаем значение N из диапазона: $0,16 \leq N \leq 0,23$.

Определяем тепловую нагрузку сепаратора Q :

$$Q = GrN, \text{ Дж/ч.} \quad (2)$$

Находим расход охлаждающей воды G_B :

$$G_B = \frac{Q}{(t_2 - t_1)}, \text{ кг/ч}, \quad (3)$$

где t_2 – конечная температура охлаждающей воды, °С (принимаем $t_2 = t_{II} - 10$ °С);

Выбираем длину труб ℓ : ($1,5 < \ell < 4,5$);

Задаемся величиной диаметра трубок d ;

Определяем шаг трубного пучка t в сечении, нормальном направлению движения пара:

$$t = (1,2-2) d, \text{ мм}. \quad (4)$$

В зависимости от величины давления P , задаемся значением приведенной скорости пара в трубном пучке \bar{W}'' .

Находим площадь сечения межтрубного пространства в плоскости, нормальной движению пара:

$$F_{\text{сеч}} = \frac{G_{II}(1 - N/2)}{3600 \rho'' \bar{W}''}, \text{ м}^2. \quad (5)$$

Определяем количество труб в одном ряду трубного пучка:

$$n'_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{сеч}}}{\ell(t - d)} - 0,5. \quad (6)$$

Уточняем значение приведенной скорости пара по уравнению:

$$\bar{W}'' = \frac{G_{II}(1 - N/2)}{(n'_{\text{тр}} + 0,5)(t - d)\ell 3600 \rho''}, \text{ м/с}. \quad (7)$$

Находим величину поверхности теплообмена сепаратора:

$$F = \frac{Q}{K_T \Delta t_{\text{ср}}}, \text{ м}^2, \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя разность температур между паром и охлаждающей водой, °С;

K_T – коэффициент теплопередачи, Вт/м²°С.

Определяем количество рядов трубок в трубном пучке n :

$$n = \frac{F}{n'_{\text{тр}} \pi d \ell}. \quad (9)$$

Найденное значение n округляем в большую сторону до целого числа.

Вычисляем величину K_p :

$$K_p = \frac{P}{g \rho'' L} \cdot \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{1}{\sqrt{We}} = \frac{P}{\sqrt{\sigma(\rho' - \rho'')g}}. \quad (10)$$

Находим значение Re :

$$Re = \frac{\bar{W}'' d_{\text{экв}} \rho''}{\mu''} \quad (11)$$

Определяем величину минимального уноса C_{min} :

$$C_{\text{min}} = 6,93 \cdot 10^{-7} Re^{-1,6} N^{-1,45} K_p^{1,43}. \quad (12)$$

Отсутствие ограничения по гидравлическому сопротивлению сепаратора позволяет на этом закончить расчет. В противном случае определяется потеря давления пара в межтрубном пространстве трубчатого пучка по известной методике и сравнивается с заданным гидравлическим сопротивлением сепаратора. При этом необходимо увеличить площадь сечения межтрубного пространства за счет уменьшения длины труб и увеличения диаметра корпуса.

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.

Способ внутрициклового регулирования кинематических параметров рычажного механизма

К.т.н. доцент Иванов В.А., к.т.н. доцент Бровкина Ю.И.

Университет машиностроения
8(499)267-07-12, tmir1941@mail.ru
8(499)267-07-12, sili2@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность получения любого требуемого закона движения выходного звена в четырёхзвенном рычажном механизме путем внутрициклового изменения длины какого-либо звена. Выведены аналитические зависимости для определения закона изменения длин звеньев, обеспечивающего требуемые кинематические характеристики выходного звена. Приведён пример осциллограммы перемещений и скоростей рабочего звена опытного образца машины с кривошипно-ползунным приводом, обеспечивающим постоянство скорости рабочего звена в заданном диапазоне перемещений.

Ключевые слова: внутрицикловое изменение длин звеньев, требуемый закон движения.

Современное машиностроение отличается многообразием машин и механизмов, выполняющих самые разнообразные комплексы технологических операций. Качественные характеристики этих операций и производительность машин в значительной мере зависят от законов движения их исполнительных органов. Однако в ряде случаев практическая реализация требуемых законов движения приводит к значительному усложнению кинематических схем проектируемых механизмов, что часто снижает работоспособность, надёжность, технологичность конструкций. В этих условиях целесообразно использовать простейшие схемы рычажных механизмов с регулируемым движением выходных звеньев [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Одним из эффективных методов регулирования кинематических параметров рабочих звеньев является периодическое, подчиняющееся определённому закону, изменение размеров одного или нескольких звеньев внутри цикла работы устройства – внутрициклового изменения длин звеньев.

Если, например, в синусном механизме (см. рисунок 1) перемещения, скорости и ускорения описываются зависимостями

$$S_0 = r_0(1 - \cos \varphi), \quad V_0 = \omega \cdot r_0 \cdot \sin \varphi, \quad \alpha_0 = \omega^2 \cdot r_0 \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

то при внутрицикловом изменении длины кривошипа зависимости (1) примут вид:

$$S = r_\varphi(1 - \cos \varphi), \quad (2)$$