

УДК 664.2.032.1

А.М. Павленко, А.А. Чейлытко

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ВИХРЕВЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ КАМЕР С ПОДВИЖНОЙ ЗОНОЙ ВСКИПАНИЯ

В статье предложены физическая и математические модели, которые использовались при проектировании вихревых испарительных камер для разделения многокомпонентных сред.

Для проектирования вихревых испарительных камер необходимы обстоятельные теоретические и экспериментальные исследования аэродинамики закрученного потока с учетом подвода массы среды. В основу исследований следует заложить модель течения жидкости в вихревой камере [1] и проанализировать возможность использования этих результатов для описания вскипающих вихревых потоков.

В исследованиях [2] указано, что относительные вращательные скорости при повышении температуры (при горении солярового масла) возрастают в 1,5 раза относительно скорости холодного потока. Осевые скорости увеличились в 4 раза. Относительные величины полного и статического давления для нагретой камеры выше, чем для холодной. В то же время качественная картина в камере сохранилась без существенных изменений.

Рассмотрим вначале физическое представление процесса вихревого течения вскипающей жидкости, при этом будем основываться на физической модели [холодного] потока, представленной в работе [3].

На рисунке 1 представлена схема вскипающего потока. Вследствие взаимодействия вдоль границы a_1 , a_2 , a_3 на участке спутного течения из-за скачкообразного изменения скорости в сечении a_1 , a_3 , поток дробится на вихревые жгуты, вытянутые по поверхностям, параллельным оси потока. Вихревая модель турбулентного слоя смешения подробно рассмотрена также в работе [4]. Образовавшаяся структура начинает двигаться под действием радиального перепада давления.

В целом вскипание в потоке происходит в том случае, когда локальное давление становится ниже величины насыщения при соответствующей температуре насыщения. Если в устройстве предусмотрено глобальное снижение давления, то жидкость испаряется полностью. При анализе результатов исследований [5] традиционно принята многостадийная модель вскипания перегретой жидкости. На первой стадии генерируются паровые пузырьки, сливающиеся затем в трубки тока, которые ускоряются в большей степени, чем основной поток. Чем больше градиент давления, тем более четко проявляются эти стадии вскипания. Предлагаемая модель описывает вскипающий поток без учета обратимости. Применение такого подхода к безградиентному течению идеализировало бы решение.

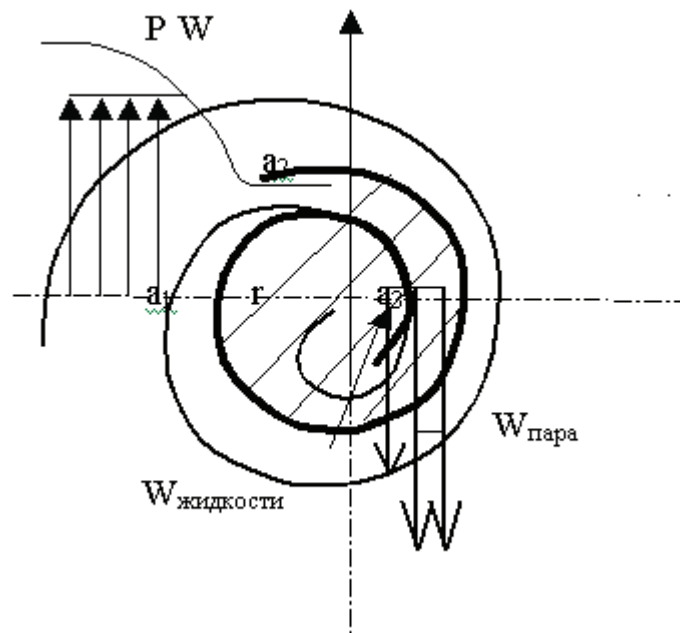


Рисунок 1 - Расчетная схема (заштрихована область двухфазного течения)

Но поскольку вихревое движение возможно при значительном градиенте давления, допущение о необратимости оправдано и модель не противоречит гидродинамическим и термодинамическим законам. Таким образом, обращаясь к рисунку 1, можно выделить три зоны однофазного и двухфазного течений. При падении давления до P_n образуется пар, который течет в виде отдельных трубок без трения, теплообмена и перемешивания. При увеличении объема среды и снижении плотности очевиден скачек скорости. Трубки тока характеризуются изоэнтропийным течением. Температура и скорость

в сечении трубок не изменяются. При дальнейшем падении давления образуются новые трубки тока пара, количество жидкости уменьшается. В случае достаточно высокого перегрева, жидкость испаряется полностью. Неиспарившаяся часть в трубке тока распределена в виде капель и движется с той же скоростью, что и пар. Процесс испарения внутри вихря удобно представить на I-S диаграмме (рисунок 2).

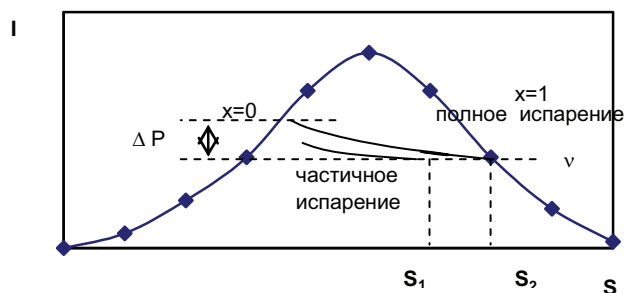


Рисунок 2 – Представление процесса вскипания на I-S – диаграмме

Используя основные термодинамические соотношения, можно записать равенство, которое следует из диаграммы:

$$\Delta p = (\Delta I' - T \Delta S) \rho' = S v \rho'.$$

Это уравнение взято за основу при дальнейшей разработке модели испарения и также в полной мере характеризует представленную физическую модель вскипающего потока: при вскипании жидкости образуется цилиндрическая зона парообразования, в которой насыщенность паром возрастает при приближении к радиусу вихря по мере падения давления. Степень испарения и конечная величина давления определяется уровнем перегрева в предположении, что размер выходного отверстия соответствует массовому расходу среды. Следуя приведенному представлению течения фаз, их скорости различаются внутри вихревого потока. Примем, что при увеличении паросодержания скорости фаз приближаются по своим значениям и в сопле выравниваются.

Математическое представление вскипания жидкости в вихре

Предложенная выше физическая модель процесса вскипания перегретой жидкости в вихревых аппаратах может быть представлена следующей системой уравнений для области основного вихря:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dr} = K \rho M_K^2 \frac{W^2}{r}; \\ PV \frac{d(rW)}{rdr} = \frac{1}{k} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rW)}{dr} \right) + \gamma(r)W; \\ \frac{\rho}{r} \frac{d(rV)}{dr} = -\gamma(r); \\ \rho = const; \\ \gamma(r) = A_1 + A_2 r^\alpha; \\ \text{При} \left[\begin{array}{l} r = 1, V = -1; W = 1; \rho = const; \\ r \rightarrow 0, rW = 0 \end{array} \right], \end{array} \right. \quad (2)$$

где P -давление; r -радиус вихря; K -показатель адиабаты; M_K -число Маха; W -окружная скорость; V -радиальная скорость; $\gamma(r)$ – скорость отвода массы, представленная в виде ряда с коэффициентами A_1, A_2 , и показателем степени α ; ρ - плотность.

Течение в области вихресточка можно представить следующей математической моделью:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial r} \left(\frac{B}{M_K} \right)^2 \frac{1}{K} = \frac{4}{3k} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rV)}{dr} \right) + \gamma(r)V - V \frac{dV}{dr} + B^2 \frac{W^2}{dr}; \\ V \frac{d(rW)}{rdr} = \frac{1}{k} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rW)}{dr} \right) + \gamma(r)W; \\ \frac{1}{r} \frac{d(rV)}{dr} + \frac{dV}{dz} = -\gamma(r); \\ U \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{K} \left(\frac{B}{M_K} \right)^2 \frac{\partial P}{\partial z} + \gamma(r)U, \\ \rho = const; \\ \gamma(r) = A_1 + A_2 r^\alpha; \\ \text{При} \left[\begin{array}{l} r = 1, V = -1; W = 1; U = 0; P = 1 \\ z = 0, U = 0 \\ r = 0, rW \rightarrow 0; V = 0; U = const. \end{array} \right], \end{array} \right. \quad (3)$$

где z – координата по оси вихревой камеры.

На рисунке 3 показано совмещенное решение (2) и (3) для вскипающего и «холодного» потоков. Графические зависимости иллюстрируют предложенное физическое представление процесса вскипания жидкости в вихре и согласуются с экспериментальными данными работы [3].

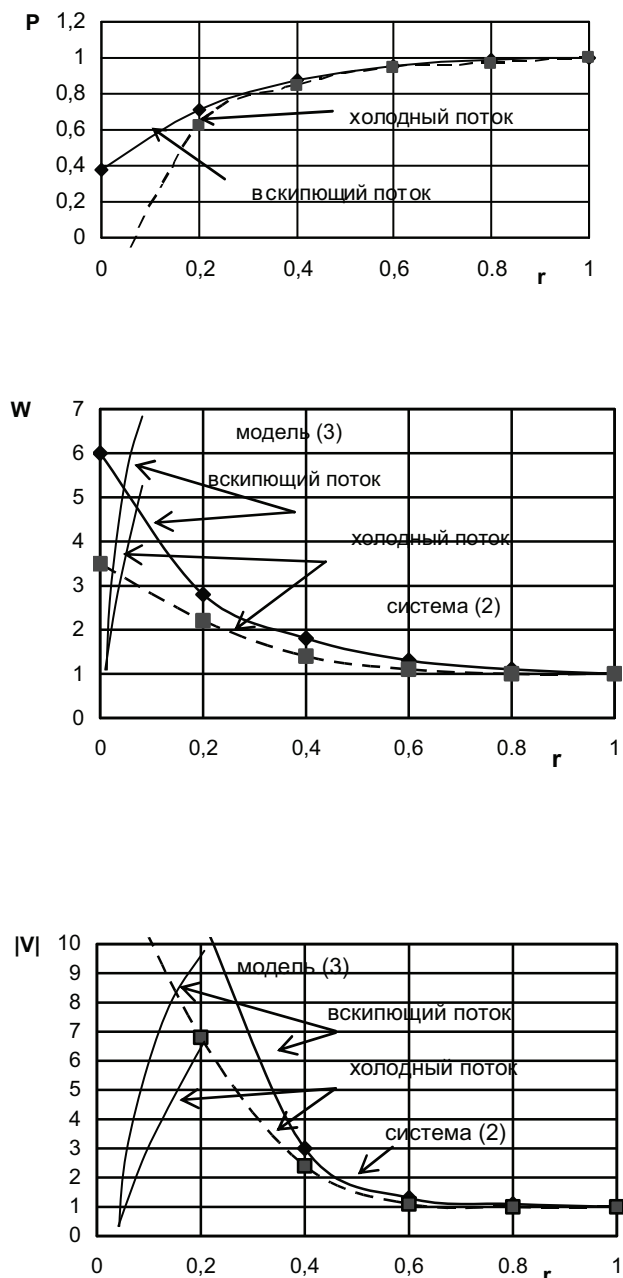


Рисунок 3 – Решение уравнений (2) и (3)

Приведенные математические модели могут быть заложены в основу расчета и проектирования вихревых контактных аппаратов или вихревых устройств, в которых масса потока переменна, например, аппаратов для термического разделения эмульсий [6]. Учитывая опыт эксплуатации таких устройств, следует отметить, что, как правило, в области вихрестоя процесс парообразования практически завершен. Поэтому для многих случаев можно принять

без существенной погрешности расчета $\gamma(r)=0$ в системе уравнений (3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко А.М. Стійкість емульсій при технологічних впливах. - Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2000. - 140 с.
2. Коваль В.П., Михайлов С.Л. Гидродинамические характеристики центробежной форсунки// Теплоэнергетика, №5, 1972.
3. Вулис Л.А., Устименко Б.П. О влиянии неизотермического поля на аэродинамику потока в циклонной топочной камере// Теплоэнергетика, №4, 1956. - С.37.
4. Калишевский Л.А. Структура потока и аэродинамические характеристики циклонной камеры при горении// Теплоэнергетика, №2, 1958. - С.20.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974.- 711с.
6. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. - 592 с.

Получено 31.01.2008 г.