

2. *Исаченко В.П.* Теплообмен при конденсации. — М.: Энергия, 1977. — 240 с.

3. *Fujii T., Uehara H., Kurata Ch.* Laminar filmwise condensation of flowing vapour on a horizontal cylinder // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* — 1972. — Vol. 15, № 2. — P. 235–246.

4. *Бойко Л.Д., Кружилин Г.Н.* Теплоотдача при конденсации пара в трубе // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.* — 1966. — № 5. — С. 113–128.

5. *Риферт В.Г., Сардак А.И., Тобилевич А.Н.* Режимы течения фаз и теплообмен при конденсации пара внутри горизонтальных труб // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.* — 1985. — № 4. — С. 101–109.

6. *С.С.Кутателадзе, А.И. Леонтьев.* Тепло-массообмен и трение в турбулентном пограничном слое.— М.: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.

7. *Справочник по гидравлике /* Под. ред. В.А. Большакова. — К.: Вища школа, 1984. — 343 с.

8. *Щукин В.К., Халатов А.А., Филін В.А.* Градиентный метод исследования теплообмена в каналах

переменного сечения // *Изв. Вузов. Серия Авиационная техника.* — 1969. — № 4. — С. 121 – 128.

9. *Сардак А.И.* Теплообмен при ламинарной пленочной конденсации движущегося пара внутри горизонтальной трубы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 1987. — 16 с.

10. *Дейнеко А.І., Гончаренко А.А., Барабаш П.О., Голяд М.Н., Горін В.В.* Метод товстостінної труби при дослідженні конденсації в трубах // *Вісник Інженерної Академії України.* — 2008. — № 1. — С. 97 – 101.

11. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1978. — 832 с.

12. *Смирнов В.И.* Курс высшей математики. Т.2. — М.: Наука, 1974. — 656 с.

13. *Бойко Л.Д.* Исследование теплоотдачи при конденсации пара внутри трубы. В кн.: Теплообмен в элементах энергетических установок. — Л.: Наука, 1966. — С. 197–212.

Получено 20.08.2008 г.

УДК 662.758

ДАВЫДЕНКО Б.В.,
ОБОДОВИЧ А.Н.,
ТЕСЛЯ А.И.,
НЕДБАЙЛО А.Н.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЫ

Методом числового моделирования досліджено вплив ширини зазору між робочими циліндричними елементами, кількості радіальних прорізів та швидкості обертання ротора на динамічні характеристики течії рідини в робочому об'ємі роторно-пульсаційного апарату. Результати досліджень можуть бути використані для оптимізації геометричних та режимних параметрів апаратів даного типу.

Методом численного моделирования исследовано влияние ширины зазора между цилиндрическими рабочими элементами, количества радиальных прорезей и скорости вращения ротора на динамические характеристики течения жидкости в рабочем объеме роторно-пульсационного аппарата. Результаты исследования могут использоваться для оптимизации геометрических и режимных параметров аппаратов данного типа.

Using the method of numerical, we study the influence of the interstice width between cylindrical working elements, the quantity of radial slits and rotor rotation velocity on the dynamic characteristics of liquid flow in the working volume of a rotor pulse apparatus. The results of investigation can be used for the optimization of geometrical and conditional parameters of the apparatus of this type.

G_r – расход жидкости в радиальном направлении;
 \bar{V} – среднемассовая скорость в радиальном направлении;
 Q – мощность источников тепловыделения;
 z – количество радиальных прорезей в рабочих элементах;

δ – ширина зазора между цилиндрическими элементами;
 μ – вязкость;
 $\Delta\tau$ – период;
 ω_0 – угловая скорость ротора.

Введение

Роторно-пульсационные аппараты (РПА) считаются одними из наиболее эффективных устройств для производства мелкодисперсных эмульсий из гетерогенных смесей взаимно нерастворимых жидкостей. Рабочими органами РПА являются полые коаксиальные цилиндрические тела, разделенные узкими зазорами и снабженные радиальными прорезями. Эти цилиндрические тела либо жестко закреплены (статоры), либо вращаются с высокой угловой скоростью (роторы). Роторы и статоры располагаются последовательно. Неподвижными и вращающимися рабочими органами создаются такие гидродинамические условия, при которых текущая через рабочую зону гетерогенная среда подвергается воздействию импульсно изменяющихся во времени градиентов давления, а также нормальных и касательных напряжений. Такое воздействие на поток приводит к импульсному изменению величин и направлений векторов скорости и ускорения, что в итоге вызывает дробление дисперсных включений.

Кроме степени дисперсности обрабатываемой гетерогенной смеси, весьма важными техническими характеристиками РПА считаются среднемассовая радиальная скорость ее течения \bar{V} , определяющая производительность аппарата, и уровень тепловыделений в рабочей зоне за счет диссипации механической энергии Q . Из аппаратов, обеспечивающих заданный размер дисперсных включений, наиболее эффективным является тот, у которого выше производительность и ниже суммарная мощность источников тепловыделения, характеризующая непроизводительные затраты энергии. Указанные технические показатели определяются геометрическими и режимными параметрами РПА, среди которых наиболее важными следует считать ширину зазора между цилиндрическими рабочими элементами,

количество радиальных прорезей и скорость вращения ротора. Влияние указанных параметров на среднемассовую скорость течения и мощность источников тепловыделения за счет диссипации энергии в рабочей зоне РПА рассматривается в данной работе.

Постановка задачи и результаты численного исследования динамических характеристик потока в рабочей зоне РПА

В основу исследований указанных характеристик положен метод численного моделирования течения вязкой жидкости через рабочую зону РПА. Течение рассматривается как двумерное в горизонтальном сечении аппарата, перпендикулярном общей оси рабочих элементов. Гетерогенный поток считается однородной средой с эффективными теплофизическими свойствами. Рассматривается сектор, включающий периодически повторяющиеся фрагменты рабочей зоны, содержащий прорези статоров и ротора, а также левую и правую половины стенок статоров. Граничные условия на левой и правой плоскостях, ограничивающих рассматриваемый сектор, задаются, как условия периодичности. Между входным и выходным сечениями рабочей зоны задаются нулевые значения тангенциальной скорости и нулевой перепад давления. Движение среды в данном случае происходит за счет центробежных сил, возникающих вследствие вращения ротора. Скорость на поверхностях статора равна нулю, а на поверхностях ротора равна заданной угловой скорости его вращения. В такой постановке задачи динамики и теплопереноса решаются методом конечных разностей. Математическая постановка и метод численного решения поставленных задач подробно рассмотрены в [1, 2]. В этих же работах рассмотрена структура течения жидкости и поля температуры в рабочей зоне РПА.

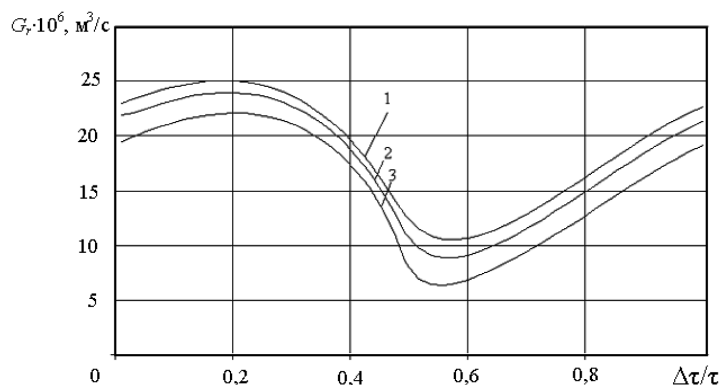


Рис. 1. Изменение во времени радиального расхода жидкости через одну прорезь в зависимости от ширины зазоров между рабочими элементами: 1 – $\delta = 0,2$ мм; 2 – $0,15$; 3 – $0,1$.

Численные исследования выполняются для аппаратов с основными геометрическими размерами, характерными для РПА типа ТФ-2 [3], при различных вариантах ширины зазоров δ между цилиндрическими рабочими элементами, различным количеством радиальных зазоров z и при различной угловой скорости вращения ротора ω_0 .

Как показали результаты расчетов, течение среды в рабочей зоне РПА – периодическое во времени. Периодом $\Delta\tau$ в данном случае будет временной интервал между двумя последовательными совмещениями прорезей ротора с прорезями статоров. Изменение за период радиального расхода жидкости с вязкостью $\mu = 0,1$ Па·с через одну прорезь в зависимости от ширины зазоров между рабочими элементами при $z = 36$ и $\omega_0 = 48$ об/с показано на рис. 1. Как видно из рисунка, при уменьшении ширины зазоров расход жидкости через прорези рабочих элементов в радиальном направлении также уменьшается.

Кроме ширины зазора, важной конструктивной характеристикой РПА является количество прорезей в цилиндрических рабочих элементах. При неизменной угловой скорости вращения ротора увеличение количества прорезей z уменьшает длительность периода $\Delta\tau$ между моментами совмещений прорезей ротора и статоров. Тем самым увеличивается частота пульсаций давления и других динамических характеристик потока обрабатываемой среды. При заданных значениях внутренних и наружных диаметров рабочих элементов, увеличение количества прорезей изме-

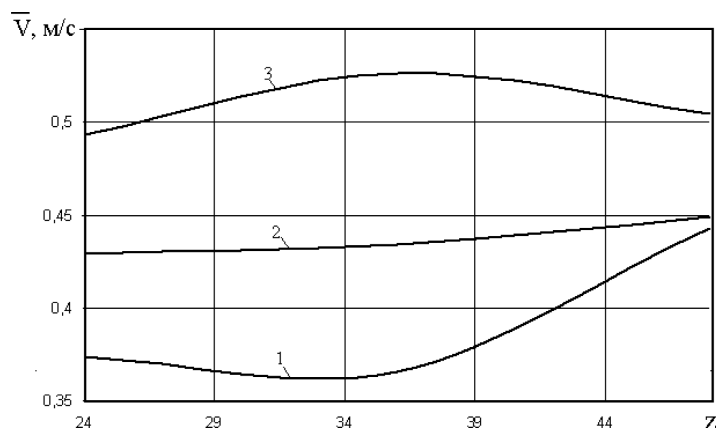


Рис. 2. Влияние количества прорезей z в рабочих элементах на осредненную за период среднемассовую радиальную скорость при $\omega_0 = 48$ об/с: 1 – $\delta = 0,1$ мм; 2 – $0,2$; 3 – $0,3$.

няет соотношение между длиной и шириной прорези. Это приводит к изменениям в структуре течения жидкости. При этом также изменяются значения рассмотренных выше динамических параметров потока.

Зависимости осредненной за период $\Delta\tau$ среднемассовой радиальной скорости жидкости вязкостью $\mu = 0,01$ Па·с от количества прорезей z для различных значений ширины зазоров δ представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, характер изменения \bar{V} от z оказывается различным для разных δ . Так для случая $\delta = 0,2$ мм, значение \bar{V} слабо монотонно возрастает с увеличением z . Однако для $\delta = 0,1$ мм функция $\bar{V}(z)$ имеет минимум при $z = 34$, а для $\delta = 0,3$ мм – максимум при $z = 37$. Такие особенности изменения \bar{V} в зависимости от числа прорезей объясняются сложным характером структуры течений и перераспределения центробежных сил, вызывающих движение среды в радиальном направлении. При этом с увеличением ширины зазора δ значения \bar{V} увеличиваются так же, как и в случае, представленном на рис. 1.

Рассмотренные результаты относятся к случаям вращения ротора с угловой скоростью $\omega_0 = 48$ об/с. При увеличении скорости вращения ротора усиливается воздействие центробежной силы на радиальное течение среды через рабочую зону, поэтому с увеличением ω_0 увеличивается также и среднемассовая скорость течения среды. Это следует из результатов расчетов, полученных для

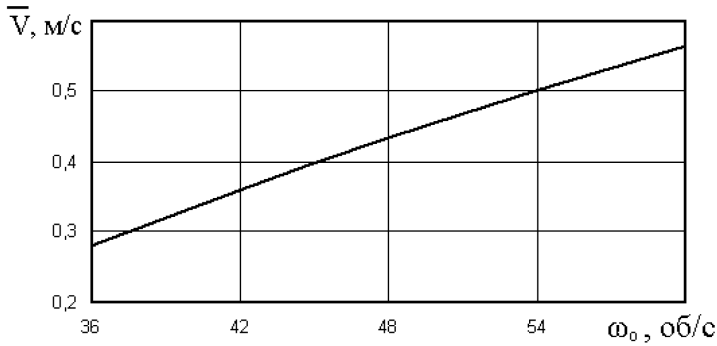


Рис. 3. Влияние угловой скорости вращения ротора на осредненную за период среднемассовую радиальную скорость среды.

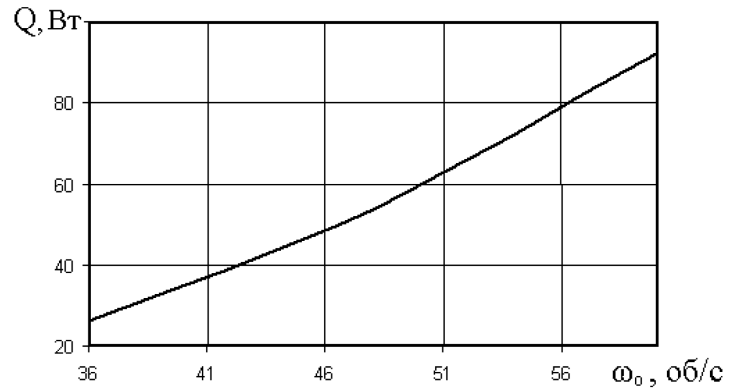


Рис. 5. Влияние угловой скорости вращения ротора на суммарную мощность тепловыделений в рабочей зоне РПА при $z = 36$, $\delta = 0,2$ мм.

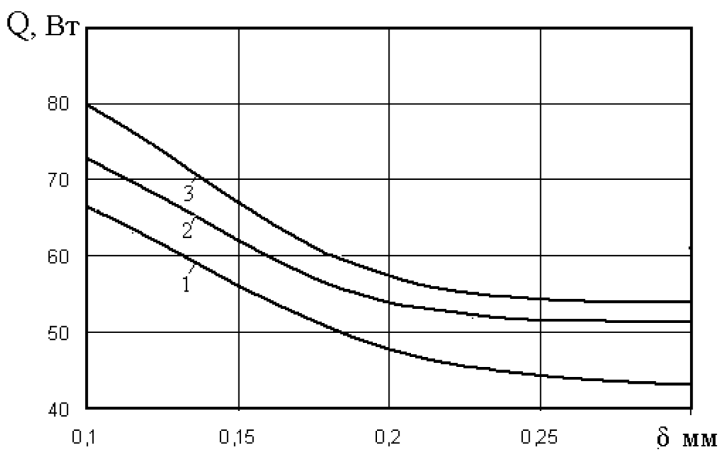


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности тепловыделения от ширины зазоров при различном количестве прорезей ($\mu = 0,01$ Па·с, $\omega_0 = 48$ об/с): 1 – $z = 24$; 2 – 36; 3 – 48.

жидкости с вязкостью $\mu = 0,01$ Па·с для случая $z = 36$ и $\delta = 0,2$ мм (рис. 3).

Как уже упоминалось, важной характеристикой работы РПА является осредненная за период суммарная мощность тепловыделений в рабочей зоне Q за счет диссипации энергии. Зависимости данной величины от ширины зазоров δ , полученные для различных значений количества прорезей, представлены на рис. 4. Как и следовало ожидать, для любого количества прорезей имеет место рост суммарной мощности тепловыделений с уменьшением ширины зазоров. В интервале $0,1$ мм $< \delta < 0,2$ мм увеличение тепловыделений с уменьшением ширины зазоров более интенсивное, чем в интервале $0,2$ мм $< \delta < 0,3$ мм. Что касается влияния числа прорезей на уровень

тепловыделений, то за счет увеличения частоты пульсаций всех динамических характеристик течения с увеличением числа прорезей увеличиваются также и мощность диссипативных тепловыделений Q .

При увеличении скорости вращения ротора увеличиваются как касательные напряжения в прорезях, так и среднемассовая радиальная скорость течения среды. В результате возрастает гидродинамическое сопротивление потоку в рабочей зоне, вследствие чего увеличиваются и диссипативные тепловыделения (рис. 5).

Выводы

Анализ влияния геометрических и режимных параметров РПА показал, что при уменьшении ширины зазора между рабочими элементами уменьшается расход жидкости в радиальном направлении. При этом значительно возрастают диссипативные тепловыделения в рабочей зоне. Увеличение количества прорезей в рабочих элементах может приводить в зависимости от ширины зазора как к увеличению, так и уменьшению среднемассовой радиальной скорости. Мощность источников тепловыделения с увеличением количества прорезей возрастает. С ростом же числа оборотов ротора увеличиваются как среднемассовая радиальная скорость течения обрабатываемой среды, так и суммарная мощность тепловыделения за счет диссипации энергии. Представленные результаты могут использовать-

ся для оптимизации геометрических и эксплуатационных параметров РПА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басок Б.И., Кравченко Ю.С., Давыденко Б.В., Пироженко И.А. Исследование микроструктуры потока жидкости в роторно-пульсационном аппарате // Доповіді НАНУ. – 2003. – № 11. – С. 71–76.

2. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Ободович А.Н., Пироженко И.А. Диссипация энергии в активной зоне роторно-пульсационного аппарата // Доповіді НАН України. – 2006. – № 12. – С. 81–87.

3. Басок Б.И., Гартвиг А.П., Коба А.Р., Горячев О.А. Оборудование для получения и обработки высоковязких дисперсных сред // Промышленная теплотехника. – 1996. – Т.18, № 1. – С. 50 – 56.

Получено 16.09.2008 г.