

Выводы

Выполнено обобщение экспериментальных данных по теплообмену между воздушным потоком, движущимся в трубах петлевого рекуператора, и стенками трубы при установке внутри трубы вторичных излучателей различной конструкции и геометрии.

Установлено, что в трубах с вторичными излучателями наблюдается интенсификация передачи тепла к воздушному потоку.

Обобщение экспериментальных данных в виде критериального уравнения $Nu = f(Re_d)$ обычно используемого для описания конвективного теплообмена в каналах дает удовлетворительное согласование с экспериментом при условии введения в уравнение дополнительного множителя учитывающего влияние температур внешнего по отношению к трубе теплоотдающего агента и движущегося внутри трубы потока воздуха.

* Выполнено под руководством проф. Б.С. Сороки.

УДК 532.695

ПИРОЖЕНКО И.А.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТИ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Наведено результати дослідження експериментального дослідження напірно-витратних та теплових характеристик рідини в роторно-пульсаційному апараті циліндричного типу при змінному числі обертання двигуна на модельних рідинах різної в'язкості.

Представлены результаты экспериментального исследования напорно-расходных и тепловых характеристик жидкости в роторно-пульсационном аппарате цилиндрического типа при переменном числе оборотов двигателя на модельных средах различной вязкости.

Experimental results of fluid-flow and heat characteristics of liquid in rotor-pulse apparatus of cylindrical type at variable motor speed on model mediums with different viscosity are presented.

a – ширина прорезей, м;
 b – высота прорезей, м;
 H – напор, м;
 m – число отверстий в обечайке;

n – число оборотов ротора, об/мин;
 Q – объемный расход, м³/с;
 r – радиус ротора, м;
 T – температура, К;

ЛИТЕРАТУРА

1. Чоджой М.Х. Энергосбережение в промышленности.– М: “Металлургия”, 1982.– 270 с.
2. Сорока Б.С., Шандор П., Пьяных К.Е., Педоренко А.В. Интенсификация высокотемпературного теплообмена путем установки вторичных излучателей в трубах // Пром. теплотехника.– 2003.– Т. 25.– № 4.– С.349-352.
3. Патент 22983 А, Украина, F23 L 15/04. Рекуператор/ Сорока Б.С., Карп И.Н., Шандор П. и др.– 05.05.1998.
4. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.:«Наука», 1982.– С. 472.
5. Шведжда С.А., Кионюнас А.П., Головлев И.Г. Теплообмен продольно обтекаемого цилиндра в канале, разделенном на секторы.– В кн.: Физико-технические проблемы энергетики.– Каунас: ИФТПЭ АНЛитССР.– 1986.– С.115-119.

Получено 28.09.2004 г.

δ – межцилиндровый зазор, м;

ρ – плотность, кг/м³;

τ – время, с.

Индексы:

1 – зазор между ротором и наружным статором;

2 – зазор между внутренним статором и ротором;

ср – среднее значение.

Введение

Для интенсификации процессов перемешивания, эмульгирования, смешения и гомогенизации гетерогенных систем широкое распространение получили роторно-пульсационные аппараты цилиндрического типа, представляющие собой систему неподвижных и вращающихся перфорированных цилиндров [1].

При получении в устройствах данного типа эмульсий, суспензий и паст в случае отсутствия специально предусмотренных мер по поддержанию изотермических условий имеет место заметный нагрев обрабатываемых сред. Увеличение температуры особенно ощутимо при обработке вязких сред на высоких частотах. Например, в процессе получения эмульсий с увеличением температуры вязкость и поверхностное натяжение уменьшаются, что приводит к более быстрому процессу эмульгирования. Однако значительное повышение или понижение температуры может привести к коагуляции частиц – ухудшению качества эмульсии [2]. Потому для каждой обрабатываемой системы существует своя оптимальная температура, при которой образование конечной продукции того или иного типа будет происходить наиболее эффективно. В связи с этим актуальной задачей является определение тепловых характеристик оборудования при получении гомогенных сред.

Анализ работ по изучению гидродинамических и тепловых процессов в роторно-пульсационных аппаратах и связанных с этим исследований [3-5] показал, что ранее были сделаны попытки выявить лишь гидродинамические закономерности работы РПА. В работах [6-8] проведен комплексный анализ явлений, происходящих в РПА: исследованы кинематические и динамические характеристики РПА, а также макро- и микроструктура потока жидкости. В том числе в [6] проведен

Сокращения:

дт/т – дифференциальный термоэлектрический термометр,

РПА – роторно-пульсационный аппарат;

РПУ – роторно-пульсационный узел,

т/т – термоэлектрический термометр,

ТФ-2 – тип роторно-пульсационного аппарата.

тепловой расчет при движении жидкости через роторный аппарат, результаты сопоставления которого с экспериментальными данными представлены в [9]. Однако экспериментальные данные для обрабатываемых сред получены в ходе измерения температуры в бункере аппарата (на входе), что вносит погрешность, обусловленную диссипацией энергии по гидроконтур. Экспериментальные исследования гидравлических характеристик РПА с различной компоновкой роторно-пульсационного узла в диапазоне частот от 0 до 80 сек⁻¹ представлены в [10]. Ввиду конструктивных особенностей первого (по ходу движения среды) статора, а также наличия других дополнительных элементов (крыльчатки и ножа) невозможно проведение сопоставления экспериментальных результатов исследования гидродинамических характеристик РПА с расчетными данными [8].

Цели исследования

Основной целью данной работы является экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик роторно-пульсационного аппарата типа ТФ-2 в диапазоне числа оборотов двигателя 0...4500 об/мин при обработке в нем модельных сред различной вязкости: воды и масла растительного. В частности, предусматривается определение температурных перегревов сред за один цикл в режиме рециркуляции.

Методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на установке (рис. 1), рабочим органом которой является роторно-пульсационный узел 1, состоящий из цилиндрических перфорированных обечаек: двух статоров и ротора, расположенного между ними. Основные конструкторские характери-

стики РПУ следующие: средний диаметр ротора $2r_{cp} = 64$ мм, ширина прорезей $l = 3$ мм, высота прорезей $b = 26$ мм, число прорезей прямоугольной формы $m = 30$, межцилиндровые зазоры равны: $\delta_1 = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м и $\delta_2 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м, номинальное число оборотов ротора $n = 2820$ об/мин.

В процессе экспериментальных исследований устанавливали изменение гидравлических характеристик: расхода и напора; тепловых – температур в характерных точках роторно-пульсационного узла, а также снимали показания энергетических характеристик: величины тока, напряжения и мощности. Исследования расходных и напорных характеристик проводили при номинальном ($n = 2820$ об/мин) и переменном

($n = 0 \dots 5000$ об/мин) числе оборотов двигателя с параллельным снятием тепловых характеристик. Измерение давления проводили на выходе из РПА для двух вариантов: при перекрытом и открытом вентиле 8, позволяющим определить соответственно полный напор аппарата и напор, учитывающий потери в циркуляционном контуре. В качестве модельных сред были выбраны вода техническая и масло растительное. Теплофизические параметры растительного масла «Мелисса» следующие: плотность равна $\rho = 920$ кг/м³, а эффективная вязкость, установленная экспериментальным путем на вискозиметре «Реотест 2.1», при изменении $\dot{\gamma} = 0,027 \dots 1312$ 1/с уменьшается от 0,3 до 0,07 Па·с.

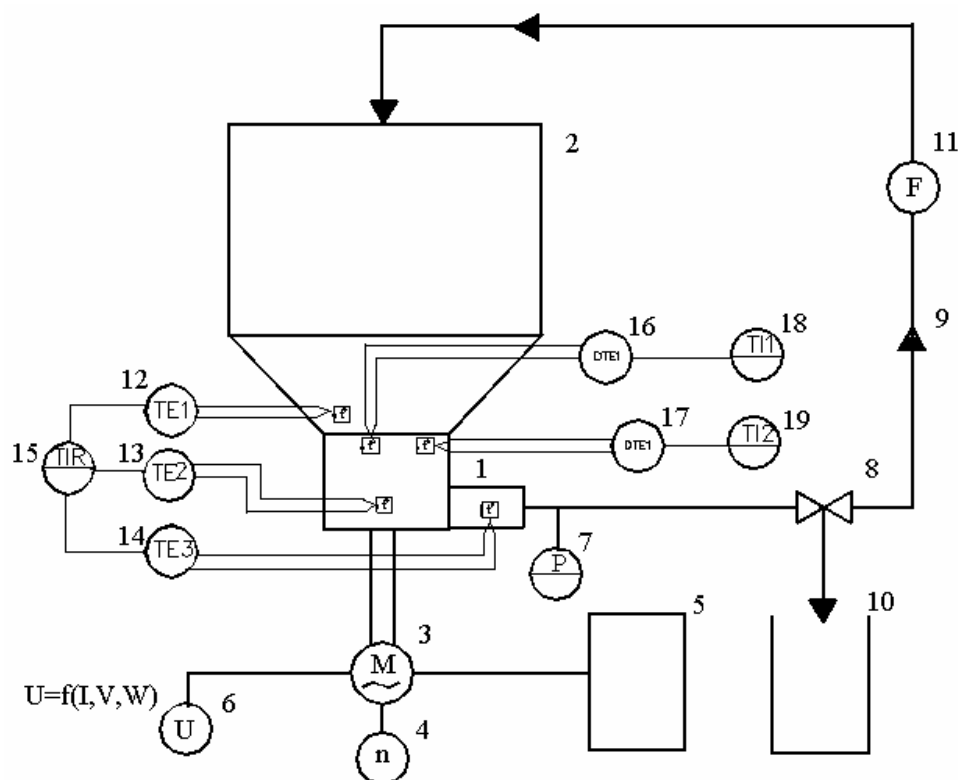


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки. Обозначения: 1 – роторно-пульсационный узел; 2 – мерная емкость; 3 – электродвигатель; 4 – тахометр; 5 – преобразователь частоты; 6 – измерительный комплекс К-505; 7 – манометр; 8 – регулирующий трехходовый вентиль; 9 – гибкий трубопровод; 10 – приемная емкость; 11 – расходомер; 12 – 14 – термоэлектрические термометры; 15 – потенциометр; 16, 17 – дифференциальные термоэлектрические преобразователи; 18, 19 – милливольтметры.

При исследовании тепловых характеристик проводилось измерение температур с помощью первичных измерительных преобразователей: термоэлектрических термометров 12 – 14 и дифференциальных термоэлектрических термометров 16, 17, а также вторичных автоматических приборов с классом точности 0,25: 15, 18, 19 – 12-ти точечного потенциометра КСП-4 и милливольтметров Щ- 68000 и В 7-35 соответственно. Термоэлектрические термометры 12 – 14 состоят из двух спаянных и изолированных по длине термоэлектродов (хромель-копель). Дифференциальные термоэлектрические термометры 18, 19 состоят из термо-электродов, материал которых: хромель-алюмель. Для защиты от внешних электромагнитных полей и механических воздействий термопары покрывались бакелитом, который фиксировался в течение 2 часов при 200 °С, и экранировались.

Температуры измеряли в характерных точках роторно-пульсационного аппарата: термоэлектрические термометры 12 – 16 были установлены на входе в роторно-пульсационный узел, на выходе из него и в пространстве между корпусом и вторым статором по ходу среды; дифференциальные термоэлектрические преобразователи 18, 19 были размещены в прорези ротора и первого по ходу среды статора – для фиксирования перепада температуры в межцилиндровом зазоре.

При исследовании гидравлических характеристик показания полного развиваемого напора фиксировали по образцовому манометру 7 при перекрытом вентиле 8. При открытом вентиле 8 устанавливали значения расходных характеристик аппарата: при обработке воды – расходомером 11, а при обработке масла растительного – объемным методом (определяли продолжительность заполнения объема приемной емкости 10 секундомером с ценой деления 0,1 с).

Параллельно измеряли потребление энергии электродвигателем измерительным комплексом К-505 6 с классом точности 0,5, включающим ватт-метр, вольтметр и амперметр. Число оборотов двигателя, задаваемое преобразователем частоты ТСП-98 5, измеряли цифровым тахометром 4 оригинальной конструкции.

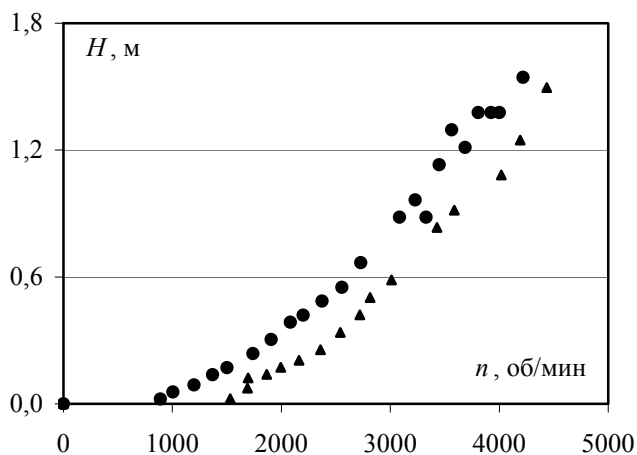
Исследования напорных, расходных и тепловых характеристик РПА проводились по следующей методике. Перед запуском роторно-пульсационного аппарата типа ТФ-2 мерную емкость 2 наполняли рабочей жидкостью. С помощью дополнительного трехходового вентиля производили продувку соединительной с манометром линии, что обеспечивало сплошное заполнение водой кольцеобразной трубки, подходящей к манометру 7, и устраняло возможное возникновение погрешности измерения напора. Преобразователем частоты 5 устанавливали нужную частоту вращения вала электродвигателя 3, а также закрепленного на нем ротора. При этом по показаниям тахометра 4 определяли число оборотов двигателя. Рабочая среда из мерной емкости 2 направлялась в роторно-пульсационный узел 1 и проходила последовательно через прорези первого неподвижного статора, вращающегося ротора и второго статора. Далее через выходной патрубок корпуса среда поступала по гидротракту 9 в мерную емкость 2. После проведения всех измерений преобразователем частоты 5 задавали новое значение частоты вращения, и измерения повторяли в аналогичном порядке.

Обсуждение результатов

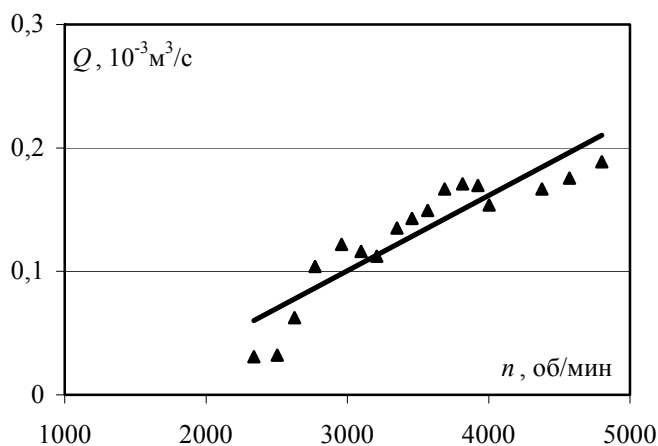
При анализе процессов, происходящих в РПА, следует полагаться на обоснованные гидродинамические соотношения, а также граничные и начальные условия, для установления которых необходимо использование исследуемых в данной работе характеристик.

В результате исследования напорно-расходных характеристик роторно-пульсационного аппарата типа ТФ-2 получены зависимости напора и расхода от числа оборотов двигателя (рис. 2).

На рис. 2а показано изменение полного развиваемого РПА напора (без потерь напора в гидротракте). Как видно, между напором и числом оборотов двигателя при обработке воды и масла существует квадратичная зависимость. Причем напорная характеристика аппарата при обработке воды выше кривой для масла растительного, что связано с более высокой вязкостью последнего.



а)



б)

Рис. 2. Напорная (а) и расходная (б) характеристики РПА типа ТФ-2 при обработке: ● – воды и ▲ – масла растительного.

Уравнения $Q = f(n)$ расходной характеристики РПА при обработке модельных сред имеют вид: $Q = 6,11 \cdot 10^{-5}n - 0,0827$ для масла и $Q = 4,65 \cdot 10^{-3}n - 4,188$ для воды, где Q в $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Как видно, аппроксимирующая прямая для масла не проходит через начало координат. Это свидетельствует о существовании подпорного режима, который создается в гидротракте до 2250 об/мин. Экспериментальные данные для воды аналогично напорному режиму находятся выше данных для масла из-за сил вязкостного трения в растительном масле. Экспериментальные данные по расходным характеристикам для воды на два порядка превышают данные для масла.

Результаты тепловых исследований в трех характерных точках РПА для воды и масла показаны на рис. 3-5. Как видно, при обработке воды заметно превышение температуры в корпусе роторно-пульсационного узла над значением температуры на выходе из аппарата. Это можно объяснить локальным нагревом среды в области вращения ротора и диссипацией энергии в окружающую среду на пути к выходному патрубку. За время обработки воды в течение 3670 сек температура на входе увеличилась на $8,4^\circ\text{C}$, а в корпусе и на выходе на $7,4^\circ\text{C}$ и $8,6^\circ\text{C}$ соответственно. Следует отметить, что температурный перегрев воды (рис. 4) при ее обработке составляет $\approx 0,1^\circ\text{C}$, причем наблюдается нелинейное увеличение перепа-

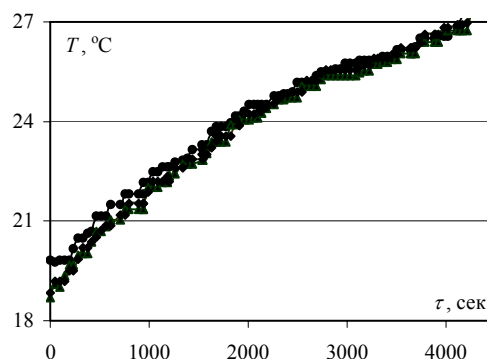


Рис. 3. Экспериментальные зависимости изменения температуры от времени при циклической обработке воды: ▲ – на входе в РПУ, ◆ – на выходе из РПУ, ● – в корпусе РПУ.

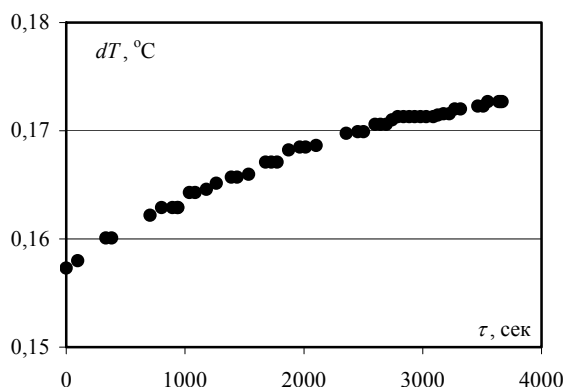
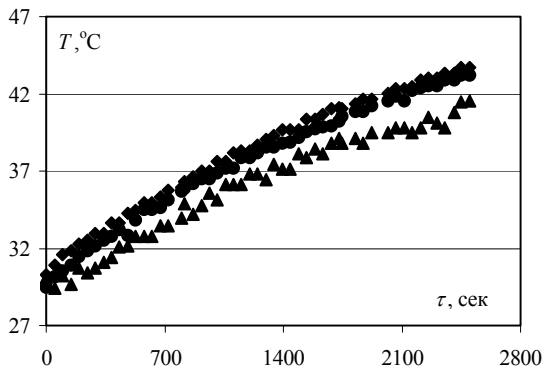
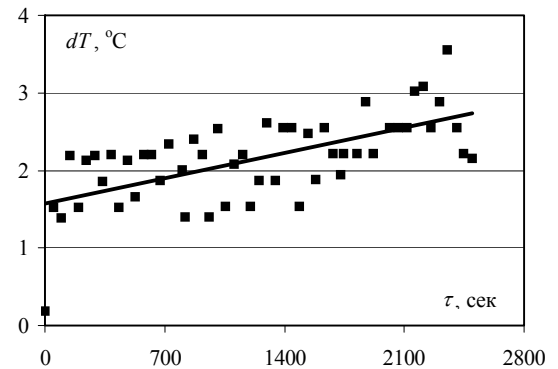


Рис. 4. Изменение температурного перегрева воды на входе и выходе из роторно-пульсационного узла от времени при циклической обработке воды.

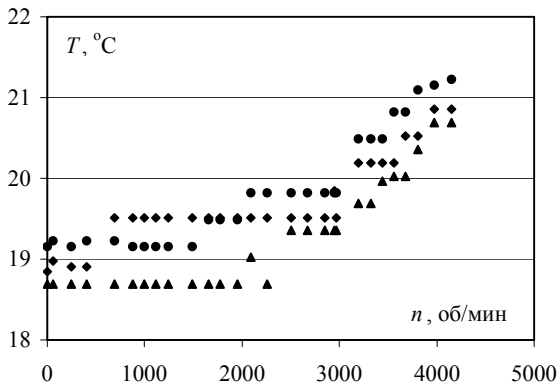


а)

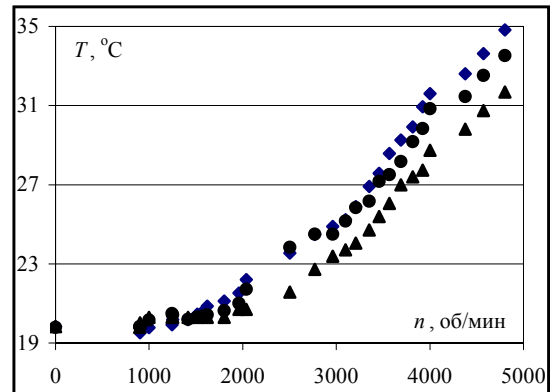


б)

Рис. 5. Экспериментальные зависимости при обработке масла растительного. Обозначения: а) $T = f(\tau)$: \blacktriangle – на входе в РПУ, \blacklozenge – на выходе из РПУ, \bullet – в корпусе РПУ; б) Изменение температурного перегрева при прохождении через РПУ во времени.



а)



б)

Рис. 6. Экспериментальные результаты измерения температуры при $n = var$ в расходном режиме для: а) воды; б) масла растительного. Обозначения аналогичны рис. 3, 5.

да температур dT между входом и выходом из аппарата.

Представленные на рис. 5а данные для растительного масла свидетельствуют о превышении температуры на выходе из РПУ значений температуры в корпусе РПУ. Это происходит из-за влияния сил вязкостного трения. Вследствие чего при обработке масла диссипация энергии происходит интенсивнее по сравнению с водой: за время 2490 секунд температура на входе в аппарат увеличилась на 11,5 °С, на выходе – на 13,7 °С, а в корпусе РПУ – на 13,4 °С. В целом, изменение температуры между входом и выходом из аппарата на порядок превышает данные для воды и описывается уравнением: $dT = 0,0005\tau + 1,578$.

Приведенные выше экспериментальные данные по тепловым характеристикам РПА были получены в режиме полной рециркуляции обрабатываемых сред при номинальном числе оборотов двигателя. Результаты изменения температуры в режиме рециркуляции при переменном числе оборотов двигателя представлены на рис. 6а, б.

Как видно, увеличение температуры при обработке воды носит скачкообразный характер, что особенно заметно в области выхода на номинальную частоту вращения. Поведение изменения температур для обрабатываемых сред в характерных точках соответствует данным, полученным при $n = const$. Наблюдается аналогичное превышение значений температуры для воды в корпусе

Т а б л и ц а . Изменение температуры во времени и в зависимости от числа оборотов двигателя

№ пп	Характерные места РПА	Температура в режиме рециркуляции, °С				Время обработки
		при $n = \text{const}$		при $n = \text{var}$		
		вода	масло	вода	масло	
1.	на входе	19,8	30,2	18,6	18,7	96
	в корпусе РПУ	18,7	30,5	19,8	19,2	
	на выходе	18,8	31,6	18,8	20,9	
2.	на входе	19,8	32,5	18,7	20,3	336
	в корпусе РПУ	19,1	31,1	19,2	20,2	
	на выходе	19,2	32,9	19,5	19,8	
3.	на входе	21,4	35,6	19,9	24,9	1020
	в корпусе РПУ	21,9	36,9	20,5	23,4	
	на выходе	21,5	37,7	20,2	24,5	

РПУ над температурой на выходе и обратный порядок – для масла растительного.

Сопоставление тепловых характеристик РПА в режиме рециркуляции при переменном числе оборотов с результатами, полученными при $n = \text{const}$ приведены в таблице.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что температура повышается интенсивнее в режиме рециркуляции при $n = \text{const}$ во всех характерных точках для двух сред. Это связано с тем, что при $n = \text{const}$ РПА выходит сразу на номинальное число оборотов, а в режиме $n = \text{var}$ номинального числа оборотов РПА достигает только на 900 сек. Следовательно, возможен нагрев от механического воздействия вращающихся элементов.

Выводы

Проведение экспериментальных исследований тепловых и гидродинамических характеристик роторно-пульсационного аппарата типа ТФ-2 позволило установить характер изменения напора и расхода при переменном числе оборотов двигателя в режиме полного развиваемого напора и режиме рециркуляции при обработке модельных сред различной вязкости. Отмечено, что при обработке масла растительного величины напоров и расходов ниже, чем при переработке маловязких

сред, в данном случае – воды. Результаты же температурных исследований в характерных местах роторно-пульсационного узла свидетельствуют о более значительном перегреве при обработке масла: температурные перегревы превышают на порядок данные, полученные для воды, и свидетельствуют о более сильной диссипации энергии.

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда фундаментальных исследований министерства образования и науки Украины (проект № 040700019).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. - М.: Медицина, 1983. - 160 с.
2. Эмульсии. Под ред. Абрамзона А.А. - Л.: Химия, 1972. - 448с.
3. Дерко П.Б. Барам А.А., Коган В.Б. Новичков А.Н., Федоров О.К. О гидромеханических закономерностях работы роторно-пульсационных аппаратов // Теоретические основы химической технологии. - 1973. - Т. 7. - № 3. - С. 123-125.
4. Барам А.А., Лошакова О.А. Гидродинамические закономерности работы аппаратов роторно-пульсационного типа // Теоретические основы химической технологии. - 1978. - Т. 12. - № 2. - С. 231-240.

5. *Киладзе Г.Т.* Автореферат диссертации канд. техн. наук.- Л.- 1975.- 23 с.
6. *Накорчевский А.И., Басок Б.И.* Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках.- К.: Наукова думка, 2001.- 346 с.
7. *Басок Б.И., Давыденко Б.В., Кравченко Ю.С., Пироженко И.А.* Экспериментально-аналитическая модель динамики жидкости в роторно-пульсационном аппарате// Доповіді Національної академії наук України.- 2003.- № 10.- С. 90-96.
8. *Басок Б.И., Давыденко Б.В., Кравченко Ю.С., Пироженко И.А.* Исследование микроструктуры потока жидкости в роторно-пульсационном аппарате// Доповіді Національної академії наук України.- 2003.- № 11.- С. 71-76.
9. Диссипативный эффект в роторно-пульсационных аппаратах// Приложение к журналу "Промышленная энергетика".- 2003.- Т. 25.- 4.- С. 336-338.
10. *Баок Б.И., Накорчевский А.И., Рыжкова Т.С., Пироженко И.А.* Гидравлические характеристики роторно-пульсационного аппарата ТФ-2// Вестник НТУУ "КПИ".- 2001.- Т. 40.- С. 160-162.

Получено 26.10.2004 г

УДК 637.181 (088.8)

МАРЧЕВСЬКИЙ В.М., СЕМІНСЬКИЙ О.О.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

ТЕХНОЛОГІЯ І ПРИСТРІЙ ДЛЯ РОЗМЕЛУ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ У ВОДІ

Ґрунтуючись на сьогочасних тенденціях розвитку технологій для переробки рослинної сировини, в роботі вказано на основні недоліки роторно-пульсацийних апаратів, як найпоширенішого типу розмельного обладнання при обробці згаданих матеріалів, описано апарат нової конструкції і принцип його дії в новоствореній лінії, призначеній для виробництва соєвого молока.

Основываясь на современных тенденциях развития технологий для переработки растительного сырья в работе указано на основные недостатки роторно-пульсационных аппаратов, как наиболее распространенного типа размалывающего оборудования при обработке указанных материалов, описан аппарат новой конструкции и принцип его действия в новой линии, предназначенной для производства соевого молока.

In this paper main lacks of the rotor-pulse apparatuses as most widespread types of grinding equipment for vegetative raw material processing are marked based on the nowadays tendencies of production development. The new design of apparatus and principle of its work in novel plant for soy-milk production are also described.

РПА – роторно-пульсацийний апарат,
СМ – соєве молоко.

Вступ

В теперішній час в світі велика увага приділяється екології та охороні здоров'я, наслідком чого являється інтенсивне створення і впровадження нових технологій для виробництва різноманітних видів харчових добавок і нових продуктів з

продуктів з рослинної сировини. В більшості вказаних технологій на окремих стадіях виробничого процесу використовується розмель твердих тіл (деревина, соєві боби, злаки та ін.) в рідкому середовищі – найчастіше воді. Це дає можливість знизити енергоємність виробництва за рахунок зниження величини енергії розмелу в