

## МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ТЕПЛА В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

Промтов М.А., Акулин В.В.

Кафедра: “Машины и аппараты химических производств”, ТГТУ

**Ключевые слова:** роторный импульсный аппарат, теплообразование, диссипация энергии, кавитация.

**Аннотация:** Проведен анализ механизмов нагрева жидкости в роторно-импульсном аппарате. Экспериментально исследован процесс нагрева воды в одно- и многоступенчатых роторно-импульсных аппаратах.

Обозначения	
$c_c$ - удельная теплоемкость стали, Дж/с/(кг·С°)	$Q_n$ - количество тепла потраченного на нагрев жидкости, Дж
$c_v$ - удельная теплоемкость воды, Дж/с/(кг·С°)	$Q_n$ - потери тепла в окружающую среду, Аэ
$E_o$ - энергия образование кавитационного пузырька, Аэ	$r$ - радиус пузырька, м
$E_c$ - энергия сжатия кавитационного пузырька, Аэ	$r_{max}$ - радиус пузырька при максимальном расширении, м
$K$ - коэффициент теплопроизводительности	$r_{min}$ - радиус пузырька при полном сжатии, м
$M_n$ - масса воды, êã	$t_{нач}$ - начальная температура, °С
$M_o$ - масса оборудования, êã	$t_{кон}$ - конечная температура, °С
$M_3$ - массовый расход жидкости, кг/с	$\Delta t$ - изменение температуры жидкости, °С
$N$ - затраты мощности на вращение ротора, Вт	$\eta$ - коэффициент полезного действия (КПД)
$P$ - давление в жидкости, при котором происходит схлопывание пузырька, Па	$v_k$ - объем кавитационного облака, м <sup>3</sup>
$P_n$ - давление насыщенного пара при данной температуре, Па	$\sigma$ - поверхностное натяжение, Н/м
$P_0$ - давление в жидкости, Па	$\phi$ - концентрация кавитационных пузырьков в жидкости
$Q_o$ - количество тепла потраченного на нагрев оборудования, Дж	

В настоящее время большое внимание уделяется поиску новых, экологически безопасных и эффективных способов получения энергии. Особое внимание при этом обращается на доступность и воспроизводимость энергетического сырья, экологическую безопасность, экономичность, промышленную реализуемость, надежность, простоту изготовления и эксплуатации оборудования.

Роторные импульсные аппараты (РИА), используемые, в основном, для интенсификации гидромеханических и массообменных процессов, применяются также и как генераторы тепловой энергии [1, 2]. В РИА нагреваемая жидкость подается под давлением в полость ротора, проходит через отверстия ротора, межцилиндровый зазор, отверстия в статоре и выводится из аппарата через рабочую камеру. При вращении ротора, его отверстия периодически совмещаются с отверстиями в статоре, что вызывает периодические пульсации потока жидкости. В результате этого в жидкости возникают импульсы давления и разрежения, интенсивная кавитация, развитая турбулентность, большие сдвиговые напряжения.

Механизм получения тепловой энергии за счет кавитации основан на её вторичных нелинейных эффектах в жидкости. Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В момент схлопывания кавитационного пузырька, давление и температура газа достигают значительных величин.

В работе [3] сделана оценка эффективности нагрева жидкости за счет кавитационных эффектов. Энергия, затрачиваемая на образование кавитационного пузырька, заполненного паром, определяется как

$$E_o = 4\pi r^2 \sigma + \frac{4}{3} \pi r^3 (P_o + P_n)$$

В первом приближении принимается  $P_o = P_n$ .

Энергия сжатия кавитационного пузырька, определяется по формуле

$$E_c = \frac{4}{3} \pi P (r_{\max}^3 - r_{\min}^3) \approx \frac{4}{3} \pi P \cdot r_{\max}^3.$$

При образовании в воде пузырька радиусом 1 мм при температуре  $t = 10^\circ \text{C}$ , давлении насыщенного пара  $P_n = 1,25 \cdot 10^3 \text{ Па}$ , поверхностном натяжении  $\sigma = 7,28 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$ , энергия образования пузырька равна  $E_o = 1,995 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ . Энергия сжатия пузырька жидкостью, находящейся при атмосферном давлении  $P = 10^5 \text{ Па}$ , равна  $E_c = 4,189 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ . Таким образом, энергия сжатия пузырька более чем в 20 раз превышает энергию его образования [3].

В таблице 1 приведены значения отношения энергии сжатия и энергии образования кавитационного пузырька при различных значениях давления в жидкости и давления паров в кавитационном пузырьке.

Таблица 1

**Значение отношения энергии сжатия к энергии образования кавитационного пузырька при различных значениях давления насыщенных паров в кавитационном пузырьке и давления в жидкости**

	$P \cdot 10^5, \text{ Па}$					$P_n \cdot 10^5, \text{ Па}$				
	0.1	0.5	1	1.5	2	0.0238	0.0752	0.2031	0.483	0.715
						t=20 C°	t=40 C°	t=60 C°	t=80 C°	t=90 C°
$\frac{E_c}{E_o}$	2.1	10.5	20.9	31.5	41.9	20.99	6.65	2.46	1.04	0.69

На основании этих данных можно сделать вывод, что энергия сжатия кавитационного пузырька увеличивается линейно в зависимости от давления в окружающей жидкости. При увеличении температуры воды и, соответственно, давления насыщенных паров, отношение энергии сжатия и энергии образования кавитационных пузырьков уменьшается. При увеличении давления в жидкости, величина отношения энергии сжатия к энергии образования кавитационного пузырька увеличивается.

Для оценки эффективности работы такой системы коэффициент теплопроизводительности можно рассчитать по формуле [3]:

$$K = \frac{(E_c - E_o)\varphi}{E_o} = \frac{[r(P - 2P_n) - 3\sigma]\varphi}{2r \cdot P_n + 3\sigma}.$$

Массовую концентрацию кавитационных пузырьков, образующих кавитационное облако, можно определить как отношение объема кавитационного облака к объему кавитационного пузырька при максимальном расширении:

$$\varphi = \frac{3 \cdot v_k}{4 \cdot \pi \cdot r_{\max}^3}.$$

Отсюда делается вывод, что если гидравлическая система, в которой работает теплогенератор, открыта по давлению, то сжатие пузырька происходит под давлением окружающей жидкости, то есть происходит приток энергии к жидкости из окружающей среды [3].

Энергия, сообщаемая жидкости за счет схлопывания кавитационных пузырьков, прямо пропорциональна их количеству. Степень развитости кавитации определяет индекс кавитации, показывающий отношение объема кавитационного облака к общему объему жидкости в активной рабочей зоне [1]. При развитой кавитации значение индекса кавитации стремится к единице.

Вторым механизмом генерирования тепла в РИА является нагрев жидкости за счет трения в зазоре между ротором и статором. Величина теплообразования зависит от количества энергии, диссипируемой в зазоре. При вращении ротора РИА жидкость нагревается за счет диссипации энергии. Определить температуру нагрева жидкости за промежуток времени  $\Delta \tau$  можно исходя из теплового баланса, считая, что тепловые потери отсутствуют:

$$N \cdot \Delta \tau = m_3 \cdot c \cdot \Delta \tau \cdot \Delta t.$$

Изменение температуры жидкости за счет трения в зазоре можно выразить в виде:  $\Delta t = \frac{N}{m_3 \cdot c}$ .

Количество тепла, переданное жидкости за счет трения в зазоре, равно количеству энергии, диссипируемой в зазоре при вращении ротора. Затраты энергии на вращение ротора можно определить по методикам расчета, рекомендуемым авторами работ [4, 5]. При малой величине зазора расход жидкости через зазор  $m_z$  значительно меньше общего расхода  $m$  через РИА. Поэтому в реальных условиях часть жидкости, проходящая через зазор и нагревающаяся в нем, затем смешивается с основным потоком, и поэтому повышение температуры жидкости, прошедшей через зазор, незначительно и зависит от соотношения  $m_z$  и  $m$ .

Для определения эффективности работы РИА в качестве теплогенератора необходимо рассчитать следующие параметры:

- количество тепловой энергии затраченной на нагрев жидкости

$$Q_e = M_e \cdot c_e \cdot (t_{кон} - t_{нач});$$

- количество тепла, израсходованное на нагрев оборудования

$$Q_o = M_o \cdot c_c \cdot (t_{кон} - t_{нач});$$

- реальный коэффициент теплопроизводительности

$$K_Q = \frac{Q_e + Q_o + Q_n}{N \cdot 3600};$$

- коэффициент полезного действия (КПД)

$$\eta = \frac{Q_e}{N \cdot 3600}.$$

Энергия, необходимая для работы РИА складывается из энергии, затрачиваемой для вращения ротора и энергии, затрачиваемой для нагнетания жидкости в РИА. Потери тепла в окружающую среду  $Q_n$  определяются стандартными методами расчета.

Для определения коэффициента теплопроизводительности и КПД нами были произведены экспериментальные исследования по нагреву воды в одно-, двух- и четырехступенчатом РИА. Исследования проводились на установке, включающей РИА, емкость, насос, расходомер, датчики температуры, счетчик электроэнергии. Вода нагнетается в РИА из емкости насосом, затем направляется обратно в емкость. При работе установки контролировались следующие параметры: температура в емкости и на выходе из РИА; давление на входном и выходном патрубке РИА; расход воды; потребляемая мощность. При работе с многоступенчатым РИА, насос не использовался. Многоступенчатый РИА включал в себя две и четыре ступени соответственно. Каждая ступень состоит из лопастного колеса, ротора и статора. Многоступенчатый РИА представляет собой совмещенную конструкцию центробежного насоса и РИА. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду, все оборудование и трубопроводы были теплоизолированы.

Первая серия экспериментов была произведена на одноступенчатом РИА с водой массой  $M_1 = 22 \text{ кг}$ , и водой массой  $M_2 = 44 \text{ кг}$ . По результатам экспериментов были получены зависимости температуры воды и потребляемой мощности от времени  $t_{cp} = f(\tau)$ ,  $N_{cp} = f(\tau)$ . Графики зависимостей приведены на рис. 1.

Вторая серия экспериментов по нагреву воды массой  $M_3 = 230 \text{ кг}$  и  $M_4 = 340 \text{ кг}$  проводилась в двухступенчатом РИА. Третья серия экспериментов по нагреву воды массой  $M_5 = 250 \text{ кг}$  и  $M_6 = 310 \text{ кг}$  проводилась в четырехступенчатом РИА. По результатам экспериментов были получены зависимости температуры воды и потребляемой мощности от времени  $t = f(\tau)$ ,  $N = f(\tau)$ . Графики зависимостей приведены на рис. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента теплопроизводительности и КПД						
Параметр	Одноступенчатый РИА		Двухступенчатый РИА		Четырехступенчатый РИА	
	Масса воды		Масса воды		Масса воды	
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
$K_Q$	1,71	1,81	1,75	1,78	1,73	1,60
$\eta$	0,519	0,652	0,548	0,706	0,547	0,576

Значения коэффициента теплопроизводительности и КПД для каждой серии экспериментов приведены в таблице 2. Потери тепла в окружающую среду принимались равными 10% от тепла, затраченного на нагрев воды и оборудования.

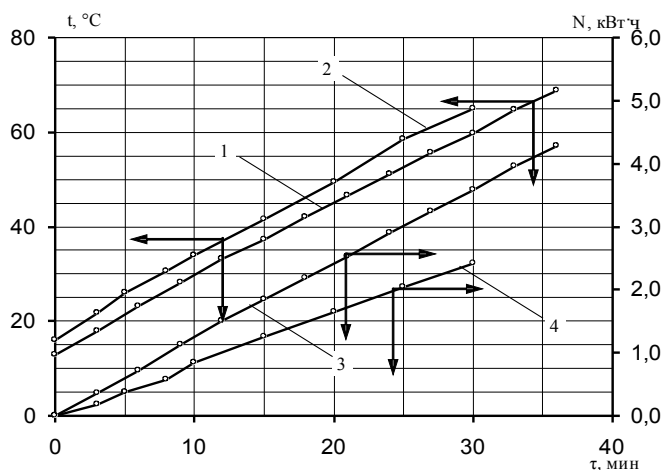


Рис. 1 Графические зависимости температуры воды и потребляемой энергии от времени, при обработке в одноступенчатом РИА, при нагреве воды массой: 1, 3; 2, 4 –.

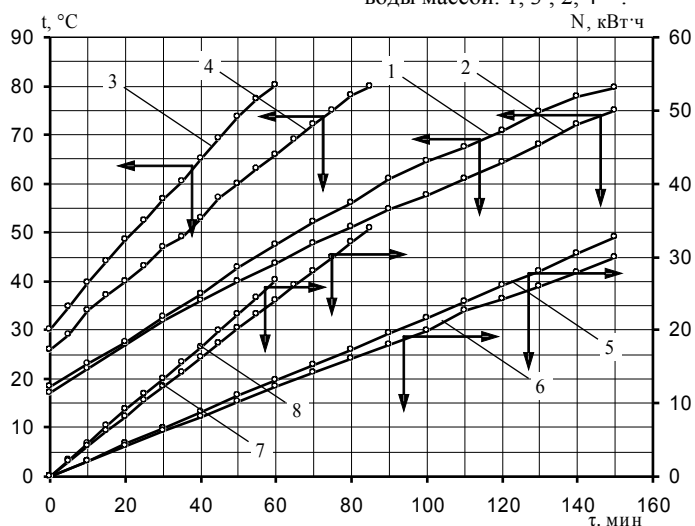


Рис. 2 Графические зависимости температуры воды и потребляемой энергии от времени в многоступенчатом РИТ, при нагреве воды массой: 1, 5 –; 2, 6 –; 3, 7 –; 4, 8 –.

Анализ графических зависимостей по нагреву воды в роторных импульсных теплогенераторах показывает, что основным фактором нагрева является кавитация. На это указывает нелинейность кривых роста температуры воды. При увеличении температуры воды растет давление насыщенных паров внутри кавитационных пузырьков, что уменьшает их энергию при сжатии, и, следовательно, интенсивность нагрева.

#### Список литературы

1. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение-1, 2001. 260 с.
2. Пат. 2054604 Российская федерация, С1 6 F 24 J 3/00, G 21 В 1/00. Способ получения энергии. Кладов А. Ф., Бюл. №5, заявл. 02.07.93, опубл. 20.02.96 – 11 стр.: 9 ил.
3. Запорожец, Е. П. Исследование вихревых и кавитационных потоков в гидравлических системах / Е. П. Запорожец, Л. П. Холпанов, Г. К. Зиберт, А. В. Артемов // Теор. основы хим. технол. – 2004. – том 38. №3. – С. 243-252.

4. Промтов М.А. Исследование гидродинамических закономерностей работы роторно-импульсного аппарата // Теор. основы хим. технол. - 2001, Т.35, № 1 . - С. 103-106.
5. В. М. Червяков, А. А. Коптев, Определение энергозатрат в роторных аппаратах / Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2005. №4. С 10-12.

**Промтов М.А., Акулин В.В. Механизмы генерирования тепла в роторном импульсном аппарате.// Вестник ТГТУ. – 2006, Т.12, №2А. – С. 364 – 369.**