

ность от 0 до 500 Вт, температура перекачиваемой воды от 20 до 85 °С. При этом максимальное значение расхода составило 90 л/ч, максимальная высота подъема воды – 185 см.

На основании проделанной работы сделан вывод: практическое использование энергии паровых снарядов для перекачивания жидкости возможно. В связи с этим открываются перспективы по созданию насоса, работающего на данном принципе.

#### *Библиографический список*

1. Стариков Е.В. К вопросу о параметрах гиперснарядного режима кипения жидкостей в стесненных условиях / Е.В. Стариков // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции с международным участием и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых 18-21 декабря 2012 г. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 173–175.

## **РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ПУЗЫРЬКОВОГО НАСОСА**

*Никитин А.Д., Стариков Е.В.  
УрФУ, studentshurik@gmail.com*

Пузырьковый насос – это устройство, которое использует энергию паровых снарядов для перекачивания жидкости. Принцип действия насоса следующий. При подводе теплоты к жидкости, находящейся в узком канале, в ней образуются крупные пузыри пара. В момент образования пузыря давление в канале повышается, и часть жидкости, равная объему образовавшегося пузыря, выталкивается через обратный клапан в напорную линию. Так как плотность пара меньше плотности жидкости, то пузырь всплывает в верхнюю часть трубки, где происходит отвод теплоты через стенки трубки в окружающую среду и конденсация пузыря. При этом давление снижается и происходит всасывание новой порции жидкости.

Для разработки физической модели работы пузырькового насоса необходимо учесть и математически описать все процессы, происходящие при его работе.

Подводимая к насосу мощность расходуется на нагрев воды, на изменение потенциальной и кинетической энергии перекачиваемой воды; часть мощности отводится в окружающую среду при конденсации пузыря. Кроме этого, необходимо учесть потери: гидравлические и тепловые. Таким образом, закон сохранения энергии имеет следующий вид:

$$N = Q \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) + \nu \cdot V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot (h_{\text{к}}'' - h_{\text{к}}') + Q \cdot \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot H + \frac{Q \cdot \rho_{\text{в}} \cdot u^2}{2} + Q_{\text{т пот}}, \quad (1)$$

где  $N$  – подводимая электрическая мощность;  $Q$  – объемный расход перекачиваемой воды;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – теплоемкость воды при давлении в трубке;  $t_{\text{вых}}$  – температура воды на выходе из насоса;  $t_{\text{вх}}$  –

температура воды на входе в насос;  $V_{\text{п}}$  – объем пузыря;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара при давлении в трубке;  $\nu$  – частота образования пузырей;  $h''_{\text{к}}$  – энтальпия насыщенного пара при давлении конденсации пузыря;  $h'_{\text{к}}$  – энтальпия насыщенной воды при давлении конденсации пузыря;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $H$  – высота подъема воды;  $u$  – средняя скорость движения воды в трубке при образовании пузыря (средняя скорость роста пузыря);  $Q_{\text{т пот}}$  – суммарная мощность потерь.

Часть импульса давления, возникающего при образовании пузыря, передается столбу воды, находящемуся в насосе и напорной линии, в результате чего столб приходит в движение, и вода перекачивается (считается, что скорость распространения импульса в воде гораздо больше скорости роста пузыря). Другая часть импульса идет на потери. Для учета потерь вводится поправочный коэффициент, равный доле импульса, затрачиваемого на совершение полезной работы. Поэтому закон сохранения импульса будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{K_{\text{р}} \cdot \Delta P \cdot S_{\text{тр}}}{\tau_{\text{и}}} = \rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}} \cdot u \quad (2)$$

где  $K_{\text{р}}$  – доля импульса, которая передается столбу воды;  $\Delta P$  – положительный перепад давления;  $S_{\text{тр}}$  – площадь поперечного сечения трубки;  $\tau_{\text{и}}$  – время образования пузыря;  $V_{\text{в}}$  – объем воды в трубке и напорной линии.

Связь расхода со скоростью:

$$Q = u \cdot \tau_{\text{и}} \cdot S_{\text{тр}} \cdot n \quad (3)$$

Связь расхода с объемом пузыря:

$$Q = V_{\text{п}} \cdot \nu \quad (4)$$

Объем воды в трубке и напорной линии:

$$V_{\text{в}} = S_{\text{тр}} \cdot H_{\text{тр}} + S_{\text{л}} \cdot (L + H) \quad (5)$$

где  $S_{\text{тр}}$  – площадь поперечного сечения трубки;  $H_{\text{тр}}$  – высота трубки;  $S_{\text{л}}$  – площадь поперечного сечения напорной линии;  $H$  – высота подъема воды;  $L$  – длина напорной линии за вычетом высоты подъема воды.

Время образования пузыря:

$$\tau_{\text{и}} = \frac{V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} (h''_{\text{к}} - h'_{\text{к}})}{N - Q_{\text{т пот}}} \quad (6)$$

где  $h''_{\text{к}}$  – энтальпия насыщенного пара при давлении испарения пузыря;  $h'_{\text{к}}$  – энтальпия насыщенной воды при давлении испарения пузыря.

Давление испарения пузыря равно сумме атмосферного давления и среднего гидростатического давления столба воды в напорной линии (среднее давление – так как высота столба воды изменяется при росте пузыря). Давление конденсации пузыря равно сумме атмосферного давления и среднего гидростатического давления столба воды в напорной линии при конденсации пузыря. Разность энтальпий насыщенного пара при давлениях испарения и конденсации составляет работу пузыря (работу насоса за один цикл).

Период импульсов давления складывается из времени нагрева всосанной порции воды, времени испарения и времени конденсации пузыря:

$$T = \tau_n + \tau_i + \tau_k, \quad (7)$$

где  $\tau_n$  – время нагрева новой порции воды;  $\tau_k$  – время конденсации пузыря.

Время нагрева новой порции воды (объем порции равен объему вытолкнутой воды, то есть объему пузыря):

$$\tau_n = \frac{V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot (t_{\text{вык}} - t_{\text{вх}})}{N - Q_{\text{т пот}}} \quad (8)$$

Время конденсации пузыря:

$$\tau_k = \frac{V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot (h''_{\text{к}} - h'_{\text{к}})}{Q_{\text{конд}}} \quad (9)$$

где  $Q_{\text{конд}}$  – мощность теплового потока, передаваемого от пузыря через стенку трубки к окружающей среде, Вт:

$$Q_{\text{конд}} = K \cdot (t_{\text{с}} - t_{\text{ср}}) \cdot F_{\text{к}}, \quad (10)$$

где  $t_{\text{с}}$  – температура насыщения при давлении конденсации пузыря;  $t_{\text{ср}}$  – температура окружающей среды;  $F_{\text{к}}$  – площадь поверхности конденсации;  $K$  – коэффициент теплопередачи.

Период импульсов обратно пропорционален их частоте:

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (11)$$

Зависимости (1)–(11) составляют систему уравнений, описывающих работу насоса.

Критерием работы насоса после решения системы является условие:

$$\Delta P, \text{кПа} \geq H, \text{см} \quad (12)$$

На рис. 1 изображена зависимость расхода от подводимой мощности, полученная в ходе эксперимента и рассчитанная по системе уравнений. На рис. 2 изображена зависимость расхода от высоты подъема воды, основанная на экспериментальных данных и полученная в результате расчета.

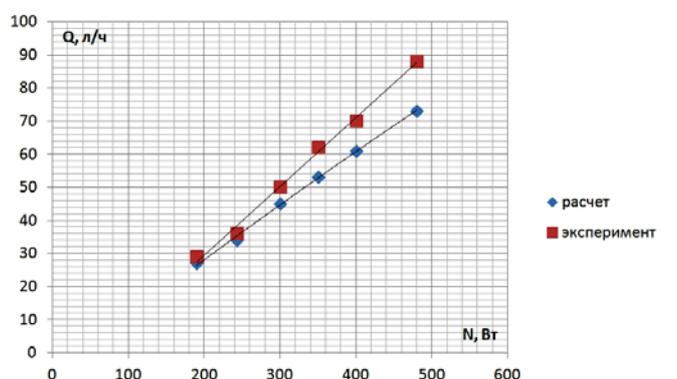


Рис. 1. Зависимость расхода от подводимой мощности

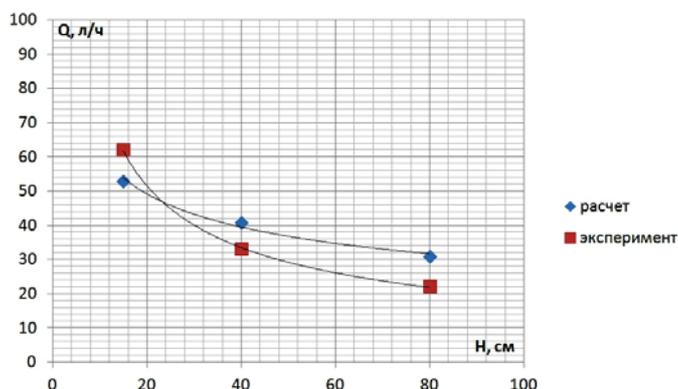


Рис. 2. Зависимость расхода от высоты подъема воды

Как видно из рис. 1 и 2, теоретическая и экспериментальная кривые близки друг к другу. На основании этого можно сделать вывод, что разработанная физическая модель работы термомеханического насоса достоверно описывает процессы, происходящие в насосе. Расхождения между теоретической и экспериментальной кривыми можно объяснить тем, что в физической модели сделан ряд допущений с целью упрощения расчета.

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ БЕРЕЗОВСКОГО ВОДОКАНАЛА**

*Осипова Е.С., Понов А.И.  
УрФУ, cvepopov@rambler.ru*

Существенное улучшение экономических и экологических характеристик производства теплоэнергии достигается с помощью теплонасосных установок (ТНУ), позволяющих трансформировать низкотемпературную возобновляемую природную энергию и вторичную низкопотенциальную тепловую энергию до более высоких температур, пригодных для теплоснабжения [1]. Кроме того, применение ТНУ позволяет приблизить тепловые мощности к местам потребления, минимизировать протяженность тепловых сетей, рассредоточить выбросы в регионе и получать в системах отопления 3-8 кВт эквивалентной тепловой энергии в зависимости от температуры низкопотенциальных источников, затрачивая при этом 1 кВт электрической энергии.

ТНУ широко распространены во многих развитых странах мира, поскольку позволяют экономить дорогостоящее топливо и снижать вредное воздействие промышленных объектов на окружающую среду. Они выпускаются и широко используются в США, Японии, Германии, Франции, Швеции, Норвегии и других странах [2].

Источником низкопотенциальной теплоты для теплового насоса (ТН) может служить тепло наземных либо подземных грунтовых вод (тепло земли), тепло наружного воздуха, производное (вторичное) тепло. Одним из вторичных энергоресурсов является тепло сточных вод.

В больших городах объемы искусственно организованных канализационных стоков достигают объемов от сотен тысяч до нескольких миллионов кубических метров в сутки. Поскольку трубы канализационных стоков проложены под землей, то температура в них остается практически постоянной в течение всего года. Температура сточных вод летом, в среднем, достигает  $+20^{\circ}\text{C}$ , зимой – не менее  $+10^{\circ}\text{C}$ . Это делает их идеальным источником низкопотенциального тепла для использования в ТН [3].

В данной работе, в качестве примера, рассматривается возможность использования теплового потенциала сбросных вод очистных сооружений для обеспечения работы систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (ГВС) объектов очистных сооружений МУП БВКХ «Водоканал» г. Березовский, Свердловская область, путем внедрения ТНУ.