

УДК 519.85:621.1:620.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГНЕТАТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Левцев А.П., д.т.н.,

Макеев А.Н.,

Кудашев С.Ф.

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

E-mail: tggi@rambler.ru

Аннотация – В работе определены зависимости амплитуды колебаний диафрагмы и подачи импульсного нагнетателя, от частоты колебаний и её площади.

Ключевые слова – импульсный нагнетатель, система теплоснабжения, генератор гидравлического удара.

Постановка проблемы. В настоящее время потенциал развития традиционных систем теплоснабжения, с точки зрения их энергоэффективности, практически исчерпан. В них почти полностью выбран максимум производительности и эффективности путём применения современного теплоиспользующего оборудования, электронных приборов учёта и контроля потребления тепловой энергии. В частности, применение профилированных каналов и насечек на теплопередающих поверхностях увеличивает коэффициент теплоотдачи не более чем на 10 %. К тому же, все без исключения, системы теплоснабжения с традиционной организацией циркуляции теплоносителя в них, не обладают самоочищающейся способностью - склонны к зарастанию, образованию накипи, шлама и прочих отложений, что дополнительно ведет к снижению теплоотдачи теплоиспользующего оборудования. Слой накипи толщиной 3 мм вызывает потерю 5-10% тепла и понижает КПД источника теплоты на 10-25%. Однако, существующие на данный момент, системы теплоснабжения могут получить принципиально новое направление повышения энергоэффективности за счет перехода к импульсной циркуляции теплоносителя. Известно, что коэффициент теплоотдачи движущегося потока значительно зависит от частоты пульсаций скорости его истечения и может увеличиваться более чем в 2 раза [1]. Так котлы пульсирующего горения при КПД 93-95 % имеют значительно меньшую поверхность теплообмена и на 30-40% меньше.

Формулировка цели статьи. Одним из кардинальных путей решения данной проблемы является перевод циркуляции теплоносителя в системе теплоснабжения из стационарного (постоянного) режима в импульсный (колебательный). При этом можно использовать несколько эффектов импульсного режима движения теплоносителя. Во-первых, увеличение теплоотдачи, как минимум, на 40%, во-вторых, самоочищение теплопередающих поверхностей оборудования и, в третьих, можно использовать генерируемый импульс количества движения теплоносителя, например, для организации циркуляции низкотемпературного теплоносителя в контуре системы теплоснабжения в случае использования независимой схемы.

Анализ последних исследований. Схемы и опытные образцы подобных импульсных систем разработаны на кафедре теплоэнергетических систем ГОУВПО «МГУ им. Н.П. Огарёва», отдельно для систем теплоснабжения, присоединяемых к источнику теплоты по зависимой и независимой схемам [5,6,7,8].

Основная часть. Принципиальная схема импульсной системы отопления, при независимом присоединении к источнику теплоты, имеет вид, представленный на рис.1. и работает следующим образом. Изначально осуществляют её заполнение соответствующими видами теплоносителей (высокотемпературным и низкотемпературным), затем, при помощи сетевого насоса 5, осуществляют циркуляцию высокотемпературного теплоносителя от источника теплоты 1 по подающему 2 и обратному 6 трубопроводам через теплообменник 3 и самовозбуждаемый генератор гидравлического удара 4, который может быть установлен в подающий 2 или обратный 6 трубопровод.

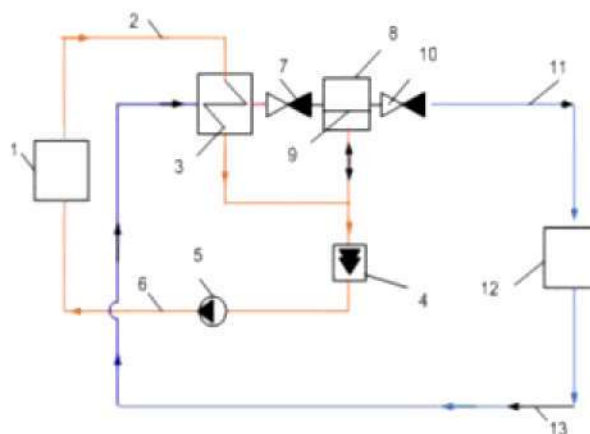


Рис. 1. Принципиальная схема импульсной системы теплоснабжения при независимом присоединении к источнику теплоты.

При достижении определенной (заданной) скорости циркуляции высокотемпературного теплоносителя через самовозбуждаемый гене-

ратор гидравлического удара 4 его проходное сечение автоматически закрывается и возникает гидравлический удар, положительная волна распространения которого, действуя с одной стороны на эластичную диафрагму 9 импульсного нагнетателя 8 приводит к осуществлению пульсирующей, соответствующей периоду смены положительной волны гидравлического удара на отрицательную, организации движения низкотемпературного теплоносителя через первый 7 и второй 10 обратные клапаны относительно второй стороны эластичной диафрагмы 9. В момент, когда положительная волна распространения гидравлического удара израсходует свою энергию и сменит знак на противоположный проходное сечение самовозбуждаемого генератора гидравлического удара 4 автоматически откроется и циркуляция высокотемпературного теплоносителя возобновится до тех пор, пока его скорость не достигнет вновь величины, достаточной для автоматического закрытия его проходного сечения. С каждым последующим циклом возобновления циркуляции высокотемпературного теплоносителя эластичная диафрагма 9 возвращается в свое первоначальное положение и при закрытом в это время обратном клапане выхода 10 производит некоторое разряжение в импульсном нагнетателе 8, благодаря чему открывается обратный клапан входа 7 и осуществляется последующая циркуляция низкотемпературного теплоносителя в системе теплоснабжения 12 через разводящий подающий 11 и обратный трубопровод 13.

Определение оптимальных конструктивных параметров импульсной системы теплоснабжения удобно производить методами математического моделирования, преимущества которых общеизвестны. Рассмотрим схему включения и действие гидродинамического водоподъемного устройства в системе теплоснабжения с независимым присоединением системы отопления (рис. 2.).

При подаче потока высокотемпературного теплоносителя на вход А происходит его перераспределение по контурам АБВГ и АДГ в зависимости от положения балансировочного вентиля Д. При этом в контуре АБВГ жидкость приобретает значение установившейся скорости $g_1 = g_2$, на участке АДГ установившаяся скорость достигает значения g_3 , на участке БЕ в начальный момент $g_4 = 0 \text{ м/с}$ и на участке АЕ $g_5 = 0$ (будем условно считать на всем протяжении работы $g_5 = 0$, т.к. g_5 в процессе нагнетания не участвует, гидроаккумулятор Е используется только для предотвращения распространения волны гидравлического удара за пределы гидродинамического водоподъемного устройства).

Благодаря особой конструкции ударного узла В поток жидкости скоростью $g_1 = g_2$ закрывает его проходное сечение и возникает гид-

равлический удар. При этом возникают и происходят одновременно волновые и гидродинамические процессы.

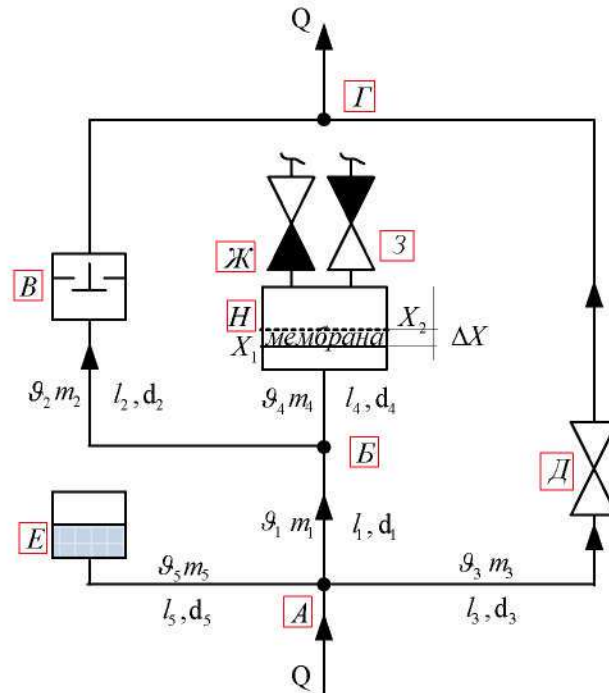


Рис. 2. Схема перераспределения потоков жидкости в гидродинамическом водоподъемном устройстве.

А - вход высокотемпературного теплоносителя; Б - узел подключения нагнетателя; В – самовозбуждаемый генератор гидравлического удара (ударный узел); Г - выход высокотемпературного теплоносителя; Д - клапан балансировочный; Е - гидроаккумулятор; Ж, З - вход и выход низкотемпературного теплоносителя

При разработке математической модели приняты следующие допущения:

1. Давление в верхней части цилиндра через клапаны (входной и выходной) равно давлению внешнему \tilde{P} , которое вполне можно считать постоянным;

2. Будем считать, что $\tilde{P} = 0$, т.к. при перемещении диафрагмы (поршня) действует разность давлений $P - \tilde{P}$, где $P > 0$;

3. На участке длительного постоянства $P(t)$ давление P_0 уравнивается силой сжатия пружины, взятой по модулю (рис.3.)

$$F_{\Gamma}^0 = k(l_0 - l_1) = P_0 S,$$

где l_0 - состояние нулевого сжатия пружины пружины, м;

l_1 - отвечает положению сжатия пружины, м;

S - площадь поршня, m^2 .

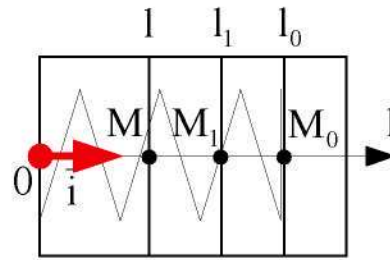


Рис. 3. Схема нагнетателя при перемещении диафрагмы (поршня) нагнетателя.

Обозначим:

$$\begin{aligned} x &= (l - l_0), \\ x_1 &= (l_1 - l_0). \end{aligned}$$

При переменном $P(t)$ возникает сила инерции $\bar{F}_{ин} = M\ddot{\bar{r}}$, которая уравнивает силу Гука $\bar{F}_Г = -kx\bar{i}$ и силу давления $\bar{F}_P = -PS\bar{i}$ (без учета силы трения).

Так как $\bar{r} = \overline{OM} = \bar{l} = (l_0 + x)\bar{i}$, то

$$\bar{F}_{ин} = M\ddot{x}\bar{i} = \bar{F}_Г + \bar{F}_P, \Leftrightarrow M\ddot{x}\bar{i} = -kx - pS, \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \ddot{x} + \omega^2 x = -\frac{S}{M}P, \\ \omega = \sqrt{\frac{K}{M}}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь M - масса, кг (зависит от перемещения поршня).

Общее решение однородного уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\tilde{x}} + \omega^2 \tilde{x} &= 0 \\ \tilde{x}(t) &= a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t), \end{aligned}$$

а частное решение подбирается в зависимости от типа $P(t)$.

Найдем решение в предположении постоянства $P(t)$ (на некотором участке (t_1, t_2)).

В этом случае :

$$x_0(t) = -\frac{S}{M\omega^2}P_0,$$

где $P(t) = P_0$. и общее решение (1) на участке постоянства $P(t) = P_0$ имеет вид:

$$x(t) = a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t) = -\frac{S}{M\omega^2}P_0, \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (2)$$

Константы a, b подбираются исходя из начальных или граничных условий.

4. Считая на участке длительного постоянства процесс установившимся, в положении l_1 , где $x_1 = x(t) = l_1 - l_0$, что отвечает давлению P_0 , получим:

$$x(t) = x_1 = -\frac{S}{M\omega^2} P_0.$$

5. Рассмотрим периодическую пульсацию $P(t)$, $t > 0$, с периодом τ , длительностью $\tau_1 < \tau$, амплитудой $\Delta P = h > 0$, представленную на рис.4.

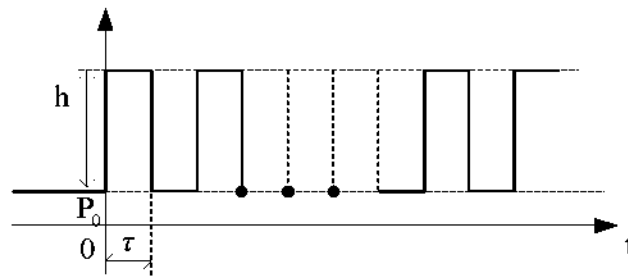


Рис. 4. Периодические пульсации $P(t)$.

С учетом формулы (2) на n -м участке при $t_{n-1} \leq t \leq t_n$ общее решение имеет вид:

$$x_n(t) = \begin{cases} a_n \cos(\omega t) + b_n \sin(\omega t) - \frac{S}{M\omega^2} (P_0 + h), & (n-1)\tau \leq t \leq (n-1)\tau + \tau_1, \\ \tilde{a}_n \cos(\omega t) + \tilde{b}_n \sin(\omega t) - \frac{S}{M\omega^2} P_0, & (n-1)\tau + \tau_1 \leq t \leq n\tau. \end{cases} \quad (3)$$

В местах скачкообразного изменения $P(t)$ добавляется половина гладкого согласования $x_n(t)$ с $\tilde{x}_{n-1}(t)$ и внутри $x_n(t)$ с $\tilde{x}_n(t)$:

$$\begin{cases} x_n(t_{n-1}) = \tilde{x}_{n-1}(t_{n-1}), \\ \dot{x}_n(t_{n-1}) = \dot{\tilde{x}}_{n-1}(t_{n-1}). \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} x_n(t_{n-1} + \tau_1) = \tilde{x}_n(t_{n-1} + \tau_1), \\ \dot{x}_n(t_{n-1} + \tau_1) = \dot{\tilde{x}}_n(t_{n-1} + \tau_1). \end{cases} \quad (4)$$

Условие (4) принимает вид:

$$\begin{cases} a_n \cos(\omega t_{n-1}) + b_n \sin(\omega t_{n-1}) - \frac{S}{M\omega^2} (P_0 + h) = \tilde{a}_{n-1} \cos(\omega t_{n-1}) + \tilde{b}_{n-1} \sin(\omega t_{n-1}) - \frac{S}{M\omega^2} P_0, \\ -a_n \sin(\omega t_{n-1}) + b_n \cos(\omega t_{n-1}) = -\tilde{a}_{n-1} \sin(\omega t_{n-1}) + \tilde{b}_{n-1} \cos(\omega t_{n-1}). \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_n \cos[\omega(t_{n-1} + \tau)] + b_n \sin[\omega(t_{n-1} + \tau)] - \frac{S}{M\omega^2}(P_0 + h) = \tilde{a}_{n-1} \cos[\omega(t_{n-1} + \tau)] + \\ + \tilde{b}_{n-1} \sin[\omega(t_{n-1} + \tau)] - \frac{S}{M\omega^2} P_0, \\ -a_n \sin[\omega(t_{n-1} + \tau)] + b_n \cos[\omega(t_{n-1} + \tau)] = -\tilde{a}_n \sin[\omega(t_{n-1} + \tau)] + \tilde{b}_n \cos[\omega(t_{n-1} + \tau)]. \end{cases} \quad (6)$$

Обозначим $\alpha_n = \omega t_n$, $\beta_n = \omega(t_n + \tau)$, перепишем (5) и (6) в следующем виде:

$$\begin{cases} (a_n - \tilde{a}_{n-1}) \cos \alpha_n + (b_n - \tilde{b}_{n-1}) \sin \alpha_{n-1} = \frac{Sh}{M\omega^2}, \\ -(a_n - \tilde{a}_{n-1}) \sin \alpha_{n-1} + (b_n - \tilde{b}_{n-1}) \cos \alpha_{n-1} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (a_n - \tilde{a}_{n-1}) \cos \beta_n + (b_n - \tilde{b}_{n-1}) \sin \beta_{n-1} = \frac{Sh}{M\omega^2}, \\ -(a_n - \tilde{a}_{n-1}) \sin \beta_{n-1} + (b_n - \tilde{b}_{n-1}) \cos \beta_{n-1} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

из (7) и (8) определяем

$$\begin{cases} a_n - \tilde{a}_{n-1} = \frac{Sh}{M\omega^2} \cos \alpha_{n-1}, \\ b_n - \tilde{b}_{n-1} = \frac{Sh}{M\omega^2} \sin \alpha_{n-1}, \\ a_n - \tilde{a}_n = \frac{Sh}{M\omega^2} \cos \beta_{n-1}, \\ b_n - \tilde{b}_n = \frac{Sh}{M\omega^2} \sin \beta_{n-1}. \end{cases} \quad (9)$$

В начальной точке $t = 0$ согласование ведется по $x_0(t) = x_1$, $x_0 = 0$ слева, а справа - $x_1(t) = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) - \frac{S}{M\omega^2}(P_0 + h)$ при $t = 0$.

Тогда получаем:

$$\begin{cases} x_0(0) = x - \frac{S}{M\omega^2} P_0 = x_1(0) = a_1 - \frac{S}{M\omega^2}(P_0 + h), \\ \dot{x}_0(0) = 0 = \dot{x}_1(0) = \omega b_1. \end{cases}$$

Таким образом для начала алгоритма имеем:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{S}{M\omega^2}, \\ b_1 = 0. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tilde{a}_1 = \frac{S}{M\omega^2}(1 - \cos(\omega\tau_1)), \\ \tau_1 = -\frac{Sh}{M\omega^2} \sin(\omega\tau_1). \end{cases} \quad (10)$$

Учитывая, что $\beta_n = \alpha_n + \omega\tau_1$ получаем:

$$\begin{cases} \cos \beta_n = \cos(\omega \tau_1) \cos \alpha_n - \sin(\omega \tau_1) \sin \alpha_n, \\ \sin \beta_n = \sin(\omega \tau_1) \cos \alpha_n + \cos(\omega \tau_1) \sin \alpha_n, \\ \alpha_n = \omega t_n = n \omega \tau. \end{cases} \quad (11)$$

Учитывая, что a_1, b_1 известны из (10), то найдем

$$\begin{cases} a_2 = a_1 + \frac{Sh}{M\omega^2} \cos \alpha_1 = \frac{Sh}{M\omega^2} (1 + \cos \alpha_1), \\ b_2 = \frac{Sh}{M\omega^2} \sin \alpha_1, \\ \tilde{a}_2 = \frac{Sh}{M\omega^2} (1 + \cos \alpha_1 - \cos \beta_1), \\ \tilde{b}_2 = \frac{Sh}{M\omega^2} (\sin \alpha_1 - \sin \beta_1). \end{cases}$$

И далее получим значения коэффициентов на n – м шаге:

$$\begin{cases} a_n = a_{n-1} + \frac{Sh}{M\omega^2} [\cos \alpha_{n-1} - \cos \beta_{n-2}], \\ b_n = b_{n-1} + \frac{Sh}{M\omega^2} [\sin \alpha_{n-1} - \sin \beta_{n-2}], \\ \tilde{a}_n = a_{n-1} + \frac{Sh}{M\omega^2} [\cos \alpha_{n-1} - \cos \beta_{n-1} - \cos \beta_{n-2}], \\ \tilde{b}_n = b_{n-1} + \frac{Sh}{M\omega^2} [\sin \alpha_{n-1} - \sin \beta_{n-1} - \sin \beta_{n-2}]. \end{cases}$$

Результаты математического моделирования, реализованные в программе Microsoft Office Excel 2003, представлены на рис. 5-6.

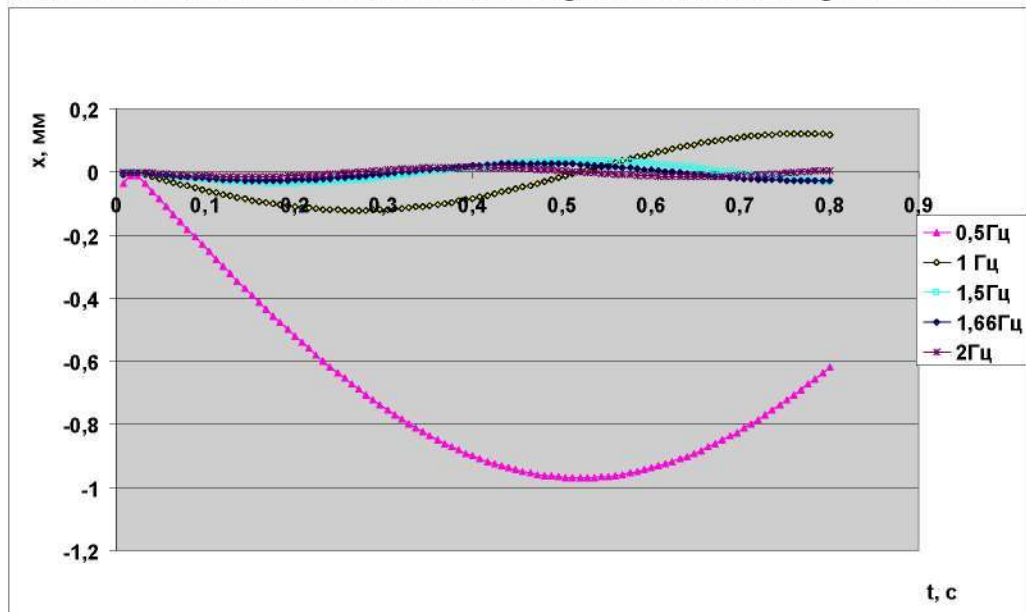


Рис. 5. Амплитуда колебаний мембраны $X(t)$ в зависимости от частоты колебаний.

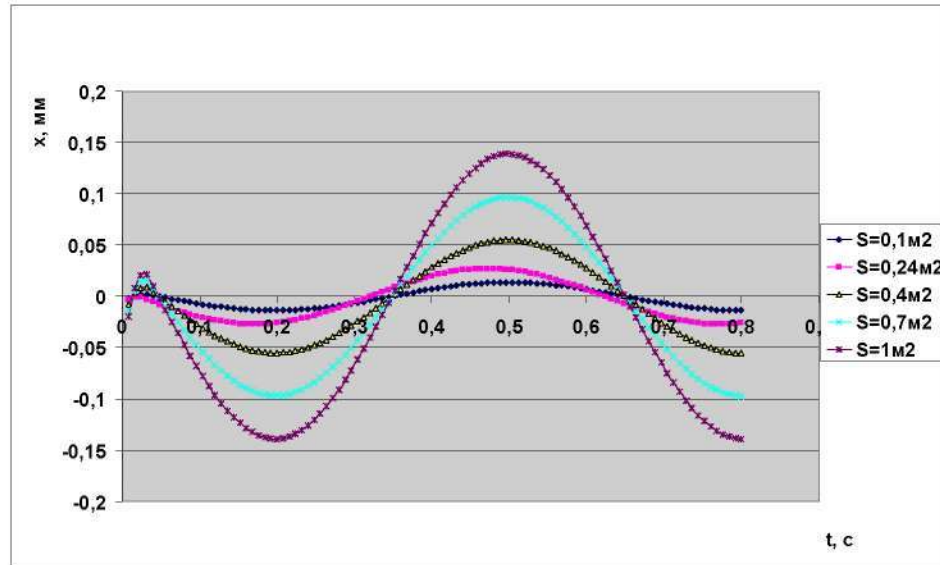


Рис. 6. Амплітуда коливань мембрани $X(t)$ в залежності від площі мембрани.

Висновки. Из графиков видно, что амплитуда колебаний диафрагмы, а соответственно и подача импульсного нагнетателя, существенно зависит от частоты колебаний и её площади. Чем меньше частота колебаний, тем больше амплитуда. Это связано с тем, что за больший промежуток времени разгона теплоноситель в питательной трубе приобретает больший импульс количества движения и потому, в момент гидравлического удара, мембрана перемещается на большее расстояние, чем при высокочастотных колебаниях.

С увеличением площади диафрагмы амплитуда также возрастает, что также соответствует действительности, так как при увеличении площади поверхности давление на единицу площади уменьшается, но в условиях, когда сила противодействия со второй стороны диафрагмы постоянна, наблюдаем увеличение подачи импульсного нагнетателя.

Литература:

1. Галицейский, Б.М. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках / Б.М. Галицейский, Ю.А. Рыжов, Е.В. Якуш. - М. : Машиностроение, 1977. -256 с.
2. Чистопольский, С.Д. Гидравлические тараны / С.Д. Чистопольский. - М.-Л. : ОНТИ, 1936 – 148 с.
3. Овсепян, В. М. Гидравлический таран и таранные установки / В.М. Овсепян. - М. : Машиностроение, 1968. – 125 с.
4. Ростовцевъ, В.Н. Утилізація малыхъ падений воды для целей осушения и орошения земель / В.Н. Ростовцевъ. - Петроградъ, 1916. – 50с.

5. Пат. РФ №82798, МПК F04F7/02. Таран гидравлический / А.Н. Макеев, А.П. Левцев. - № 2008150029; заявлено 17.12.2008; опубл. 10.05.2009, бюл.№ 13.

6. Пат. РФ №86841, МПК A01G25/00. Ударный узел для газогидравлического устройства / А.П., Левцев, А.Н. Макеев. - № 2009116882; заявлено 04.05.2009; опубл. 20.09.2009, бюл.№ 26.

7. Пат РФ №87501, МПК F24D11/00. Автономная система отопления для здания автономного пользования / А.П. Левцев, А.Н. Макеев, А.А. Лазарев. - № 2009113871; заявлено 13.04.2009; опубл. 10.10.2009, бюл.№ 27.

8. Пат. РФ №88104, МПК F24D 3/02. Система отопления (варианты) / А.Н. Макеев, А.П. Левцев, А.А. Лазарев. - № 2009126711; заявлено 13.07.2009; опубл. 27.10.2009, бюл.№ 30.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАГНІТАЧА ІМПУЛЬСНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Левцев А.П., Макеев А.Н., Кудашев С.Ф.

Анотація – В роботі визначені залежності амплітуди коливань діафрагми і подачі імпульсного нагнітача від частоти коливань і її площі.

MATHEMATICAL DESIGN OF SUPERCHARGER IMPULSIVE SYSTEM OF SUPPLY IS WARM

Levcev A.P., Makeev A.N., Kudashev S.F.

Dependences of amplitude vibrations diaphragm and serve impulsive supercharger are in-process certain, from frequency of vibrations and its area.