

В.И.Большаков, И.Б.Листопадов

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ УПРАВЛЕНИИ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Исследованы переходные процессы при ступенчатом управлении потоком жидкости в трубопроводе гидравлической системы водоснабжения установок охлаждения проката. Показано, что использование двухступенчатого закрывания клапана с длительностью первой ступени равной времени пробега фронта давления по длине трубопровода и оптимальным значением модуля первой ступени уменьшает давление при гидравлическом ударе до допустимого значения и сокращает время переходного процесса.

гидросистема, трубопровод, поток жидкости, переходной процесс, клапан, гидроудар

Постановка задачи. В составе технологических линий производства горячекатаного проката, помимо механического оборудования, обеспечивающего получение продукции, содержится отдельный класс установок функционально отличающегося от основного оборудования. К таким установкам относятся устройства обеспечивающие охлаждение горячего металла.

Для получения заданной структуры металла и механических характеристик металлопродукции в технологическом процессе производства проката используются различного рода охлаждающие устройства. К таким устройствам относятся установки ускоренного охлаждения листа в межклетевых промежутках и на отводящем рольганге, установки для термообработки элементов железнодорожных колес [1] и рельсов [2] на рельсобалочных станах. Охлаждающие устройства используются и в качестве инструмента, например, для управления тепловым профилем валков листовых станов или для поддержания заданного температурного режима работы оборудования [3]. В качестве охладителя используется вода или эмульсия, подаваемая под давлением 0,2–1МПа. В устройствах технологической смазки, например, для антикоррозионной обработки листового проката, используется масло. В ряде случаев охлаждающие устройства используются для охлаждения переднего конца проката, что улучшает условия захвата металла рабочими валками.

Для подготовки к прокатке подаваемой в прокатный стан заготовки используются устройства гидросбива и гидросмыва окалины. Устройства гидросбива окалины устанавливаются, как правило, в технологических линиях практически всех прокатных станов производящих горячекатаную продукцию. Устройства могут работать автономно как, например, при производстве труб [4] или в комплексе с окалиноломателями в виде прокатных клеток дуо с вертикальными или горизонтальными валками [5]. В качестве окалиноломателя может использоваться обжимной пресс [1]. В

устройствах гидросбива окалины используется вода высокого (до 16МПа) давления.

В установках ускоренного охлаждения листа в межклетевых промежутках и на отводящем рольганге, установках для термообработки железнодорожных колес, независимо от конструкции коллекторов и используемых для формирования факела охлаждающей жидкости насадок, гидросистемы охлаждающих устройств имеют близкую по своему построению структуру. Основным технологическим требованием является стабильность расходов жидкости под давлением 0,2–0,5МПа, подаваемых на поверхность металла или оборудования для обеспечения заданного тепло-схема.

Стабилизация подачи воды на обрабатываемое изделие обеспечивается различными способами в зависимости от параметров источника водоснабжения. Например, охлаждение полосы сверху на отводящем рольганге ШСГП 1680 м.к. «Запорожсталь» и м.к. им.Ильича осуществляется переливными охлаждающими устройствами конструкции ИЧМ. Поток подаваемой от коллектора напорной магистрали в каждое устройство воды под давлением 0,2–0,3МПа управляется на м.к. «Запорожсталь» двумя двухходовыми быстродействующими запорными клапанами конструкции ИЧМ (время срабатывания $t=0,2-0,3c$). Алгоритм управления заключается в том, что вода подается либо на полосу для ее охлаждения, либо в сливной коллектор во время пауз между полосами, т.е. вода подается непрерывно к клапанной группе и часть ее сливается в сливной коллектор. Непроизводительные потери воды зависят от ее расхода и времени пауз между полосами. Такой алгоритм управления позволяет уменьшить воздействие переходных процессов в напорной магистрали при переключении клапанов. Быстродействующие клапаны позволяют работать с незначительным упреждением по включению (клапан начинает подавать воду на устройство охлаждения перед полосой) и реализовывать различную стратегию охлаждения. На установке ускоренного охлаждения полосы МК им.Ильича управление подачей воды на полосу осуществляется по иному алгоритму. Ограничение по объему подаваемой на полосу воды вынуждает использовать одноходовые клапаны максимально приближенные к охлаждающим устройствам. Устройства подают воду на полосу и прекращают подачу воды после ее выхода из зоны действия установки. Такой алгоритм работы устройств позволяет экономить воду. Установка клапанов, непосредственно у охлаждающих устройств, уменьшает влияние переходных процессов на стабильность подачи воды в начале и конце работы установки.

При термообработке железнодорожных колес [1] обрабатываются только некоторые элементы колеса. При относительно медленном изменении давления в начале и конце термообработки существует вероятность попадания воды на необрабатываемые элементы колеса, что вызывает в них дополнительные напряжения. Такая вероятность устраняется исполь-

зованием быстродействующих клапанов и их установкой вблизи форсуночных групп спрейеров.

Более ярким примером необходимости использования быстродействующей запорной арматуры является процесс термообработки горячекатаных труб на вертикальной установке конструкции ВНИТИ. Основным требованием к термообработке труб является максимально-быстрая подача воды к внутренней и наружной поверхности трубы по всей ее длине и быстрое ее удаление из установки. Такое требование возможно удовлетворить только при использовании быстродействующих клапанов. Применение для подачи и отвода воды клапанов Ду=150 мм конструкции ИЧМ со временем срабатывания 0,2с позволило успешно решить поставленную задачу на вертикальной установке термообработки труб ТПЦ№4 НТЗ.

Высокое быстродействие запорной арматуры необходимо и для улучшения условий захвата металла валками в черновых и промежуточных группах сортовых станов путем охлаждения переднего конца заготовки. От быстродействия клапанов зависит длина охлажденного участка заготовки. Высокое быстродействие запорной арматуры необходимо и в установках, использующих для обработки металлопродукции охлаждающую жидкость высокого давления (10–16МПа). В основном это установки гидросбива окалины. Эффективность гидросбива зависит от двух основных факторов – ударного воздействия большой массы воды на обрабатываемое изделие и термическое воздействие на изделие. Величина ударного и термического воздействий прямо зависят от скорости первоначальной подачи потока охладителя на изделие. Единственным инструментом регулирующим скорость потока является запорный клапан.

Таким образом, основными технологическими требованиями к оборудованию установок ускоренного охлаждения металла, термообработки и гидросбива являются: поддержание стабильного расхода охладителя в переходных режимах работы; высокое быстродействие при подаче охладителя; максимальная экономия охладителя. Изложение основных материалов исследования

Высокое быстродействие запорных клапанов порождает противоречие между высокой скоростью сброса или набора давления в трубопроводах гидросистемы и нежелательными динамическими явлениями (гидроудар) в трубопроводах, которые инициируют высокое быстродействие запорной арматуры. Разрешение такого противоречия традиционно осуществляется синтезом конструкции и алгоритмов управления запорной арматурой гидросистем.

Для компенсации гидроударов используются различные способы, основные из которых приведены в работе [6]. Практически все известные способы компенсации гидроудара реализуются устройствами, которые имеют в своем составе сложные электромеханические следящие системы (копиры) для изменения сечения запорного элемента во время закрывания

клапана, либо специальные устройства изменяющие жесткость системы, например, пневмогидравлические аккумуляторы. Сложность конструкции оборудования для компенсации гидроударов и управления его работой ограничивает диапазон их применения в технологических линиях, в частности, в системах водоснабжения.

Большой интерес представляет способ управления дискретной запорной арматурой [7], позволяющий уменьшить нежелательные динамические явления в гидроприводе. Управление работой запорной арматуры основано на двухступенчатом открывании (закрывании) клапана (клапанов) по управляющему параметру – периоду низшей частоты колебаний рабочего органа гидросистемы. Степень открывания (закрывания) клапана зависит от динамических параметров системы. Разработанный для управления динамическими процессами в дискретных системах, способ, по мнению авторов, может быть использован и при решении задачи уменьшения гидроударов в гидросистемах с распределенными параметрами.

Используя методики работ [8, 9] представим расчетную схему трубопровода транспортирующего жидкость под действием постоянного давления в виде одномассовой модели (рис.1).

На рис.1 обозначено: p_0 – давление источника питания, МПа; p_1 и p_2 – давления жидкости на участках трубопровода, МПа; C_1 и C_2 – жесткости участков трубопровода, $C = E_i F_i / V_i$, где E_i – приведенный модуль упругости, МПа; F_i – площадь сечения трубопровода, m^2 и V_i – объем жидкости, m^3 на соответствующем участке

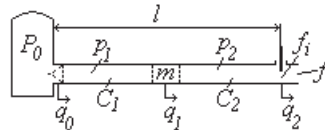


Рис.1. Расчетная схема трубопровода

трубопровода; q_0, q_2 – расходы жидкости на входе и выходе из трубопровода, q_1 – координата движения массы жидкости, m^3/c ; f – площадь максимального сечения трубопровода, m^2 ; l – длина трубопровода, m . На входе и выходе из в трубопровода установлены клапаны с проходным сечением равным проходному сечению трубопровода. Уравнения движения приведенной массы и процессов, происходящих в трубопроводах одномассовой модели, записанные в расходах, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 m_{np} \, dq_1 / dt &= (p_1 - p_2 - h q_1^2 \operatorname{sgn} q_1 - p_T \operatorname{sgn} q_1) f^2 ; \\
 dp_1 / dt &= (q_0 - q_1) E_1 / V_1 ; \\
 dp_2 / dt &= (q_1 - q_2) E_2 / V_2 ; \\
 q_0 &= \mu f_1 \sqrt{2(p_0 - p_1) / \rho} ; \\
 q_1 &= f \, dx / dt ; \\
 q_2 &= \mu f_2 \sqrt{2(p_2 - p_{cl}) / \rho} ,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где h – коэффициент жидкостного трения, кг/м^7 , $h = 0,5\rho\lambda l_i / d_i f_i^2$ [1]; ρ – плотность жидкости, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; λ – безразмерный эмпирический коэффициент [10] – для ламинарного течения жидкости $\lambda = 64\nu/ud$, где u – скорость потока жидкости, для турбулентного потока $\lambda = 0,025$ [10]; l_i ; d_i ; f_i – длина, диаметр и площадь сечения i -го участка трубопровода; $\mu = 1/\xi$ – коэффициент расхода жидкости, $\mu = 0,53$. Согласно [11] сопротивление клапанных запорных устройств при любом проходном сечении клапана равно $\xi = 3,5$. p_T – давление от силы трения.

Приведенная масса определялась по представленной в работе [9] методике $m_{пр} = \rho l f / 3$. Частота колебаний жидкости в одномассовой системе определялась по формуле $\beta = \sqrt{C / m} / 2\pi$. Частота колебаний жидкости в системе с распределенными параметрами ($\beta' = 1/t$, где t – время пробега волны по двойной длине трубопровода) определялась по формуле $\beta' = \sqrt{E / \rho} / 2l$, где l – длина трубопровода. Оценка адекватности системы с распределенными параметрами одномассовой системы производилась сравнением частот [8] $\beta = \beta'$.

С использованием математической модели стационарных и переходных процессов в трубопроводе (уравнения 1), разработана имитационная модель, в которой решение уравнений проводилось модифицированным методом Эйлера с основным шагом интегрирования $\Delta t = 0,001\text{с}$. Некоторые переходные процессы исследовались с шагом интегрирования $\Delta t = 0,0001\text{с}$ и $\Delta t = 0,00001\text{с}$.

Моделирование начинали с мгновенной подачи давления в трубопровод длиной $l = 300\text{м}$ с постоянным диаметром $d = 0,15\text{м}$ от источника постоянного давления $P_0 = 1\text{МПа}$ через клапан, установленный в начале трубопровода. Клапан, установленный в конце трубопровода, полностью открыт. Результаты моделирования приведены на рис.2.

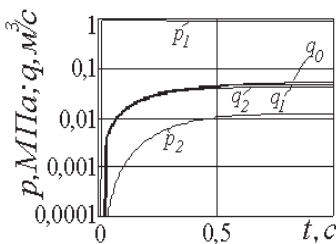


Рис.2. Переходные процессы при подаче давления в пустой трубопровод ($h > 0$; $T > 0$)

На рис.2 показано: p_1 – давление в напорной полости трубопровода (на участке источник питания – масса жидкости, см. рис.1), МПа; p_2 – давление на сливном участке трубопровода, МПа; q_0 , q_1 , q_2 – расходы жидкости соответственно на входе, в средней части (координата массы) и на выходе из трубопровода, $\text{м}^3/\text{с}$. Для наглядности, на рис.2 кривые расходов q_0 и q_2 смещены от кривой расхода q_1 на 5%, т.е. $q_0 = 1,05q_0$; $q_1 = q_1$; $q_2 = 0,95q_2$.

Процессы в трубопроводе протекают следующим образом. После мгновенного открывания клапана на входе в трубопровод на полное проходное сечение, давление p_1 в начале трубопровода увеличивается до дав-

ления источника питания 1МПа за 0,007с. Затем давление p_1 начинает падать, достигая своего установившегося значения $p_1=0,986$ МПа за 1,15с. Уменьшение давления вызвано действием сил трения, значения которых в этом примере составляют $p_f=0,21$ МПа; $h=3,19E+08$ кг/м⁷. Расходы жидкости в начале q_0 , середине q_1 и конце q_2 трубопровода имеют одинаковое значение и выходят на установившийся расход $q=0,0488$ м³/с за 1,15с. Давление в конце трубопровода p_2 устанавливается также через 1,15с и имеет значение $p_2=0,0135$ МПа.

При подаче воды может осуществляться и иная схема работы клапанных механизмов. Трубопровод заполняется жидкостью при открытии клапана в начале трубопровода, а затем открывается запорный клапан в конце трубопровода. Исследование работы системы водоподдачи по такой схеме показало, что после мгновенного открывания клапана в конце трубопровода давление p_1 начинает уменьшаться через 0,07с после открывания клапана, достигая установившегося значения через 1,15с. Давление p_2 и расход в конце трубопровода q_2 после открывания клапана уменьшаются до нулевого значения за 0,07с. В дальнейшем значения этих и других параметров увеличиваются, достигая установившихся значений через 1,15с. Как и в предыдущем примере кривые изменения параметров в переходных процессах конгруэнтны при разных способах нагружения.

Таким образом, реализован переходной процесс выхода течения жидкости на установившийся стационарный режим при работе системы водоподдачи по различным схемам, т.е. с различными начальными условиями. Определены начальные условия для моделирования переходного процесса течения жидкости после мгновенного полного перекрытия сливного трубопровода.

Используя значения параметров установившегося процесса в качестве начальных условий, исследован переходной процесс при мгновенном закрывании сливного клапана. Клапан в начале трубопровода открыт. Результаты исследований при мгновенном закрывании сливного клапана приведены на рис.3,4. На рис.3 приведены кривые изменения давлений. Видно, что после закрывания клапана давление в начале

трубопровода увеличивается, достигая через 0,15с значения давления источника питания ($p_1=1$ МПа). В дальнейшем это значение давления остается неизменным. Изменение давления в конце трубопровода имеет колеба-

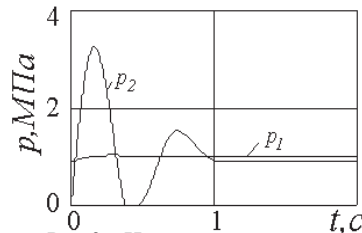


Рис.3. Изменения давления в трубопроводе

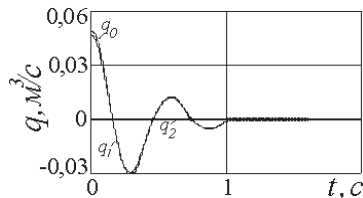


Рис.4. Изменения расходов в трубопроводе

тельный характер с максимальным значением (амплитудой) колебаний $p_2=3,3\text{МПа}$. Вид кривой изменения давления можно идентифицировать как гидроудар с трехкратным увеличением давления. После первого колебания давление достигает нулевого значения, что свидетельствует о наличии кавитационного процесса. Затухание колебаний продолжается 1с.

На рис.4 приведены кривые изменения расходов жидкости в начале q_0 , середине q_1 и конце q_2 трубопровода. Видно, что после закрывания клапана изменения давлений q_0 и q_1 имеют характер затухающих колебаний. Расход в конце q_2 трубопровода имеет нулевое значение.

Таким образом, реализован переходной процесс с гидроударом, согласованный с предшествующим гидроудару установившимся течением жидкости. Реализация перехода процесса движения воды от стационарного к нестационарному движению и обратно является, по мнению автора работы [12], наиболее сложным процессом исследования, что вынуждает принимать различные допущения в зависимости от цели исследования, вызывающие иногда «абсурдные» решения.

Для уменьшения гидроудара использован способ управления, разработанный авторами применительно к гидромеханическим системам [7]. Способ управления основан на введении обратной связи по динамическому параметру гидромеханической системы – периоду колебаний рабочего органа гидромеханизма или его близкому аналогу – времени первого достижения рабочим органом нулевой скорости при торможении. Задачей управления является устранение колебательного движения рабочего органа и предотвращение отката от достигнутого при торможении максимального перемещения. Такой способ управления фактически представляет собой дискретное (импульсное) управление реакцией гидромеханической системы, в которой управляющим параметром служит один из динамических параметров, характеризующих систему. Воздействие на гидромеханическую систему осуществляется с помощью двух последовательных импульсов с паузой между ними равной полупериоду колебаний рабочего органа. Первый импульс инициирует колебательное движение рабочего органа, а второй – трансформирует колебательное движение в аperiodическое движение. Импульсы в виде открывания (закрывания) запорного элемента связаны между собой параметром D – относительной площадью сечения открытого отверстия. $D = f_i/f_{max}$, где (для разгона рабочего органа) f_i – модуль первой ступени нагружения; $f_{max}=1$ – модуль второй ступени нагружения (клапан полностью открыт). Для торможения: $f_{max}=1$ – модуль первой ступени нагружения; f_i – модуль второй ступени нагружения.

Используя рекомендации работы [7] нами разработан и исследован способ рационального управления потоком жидкости в трубопроводе. Под рациональным управлением потока жидкости понимается дискретное управление проходными сечениями концевых клапанных механизмов с целью уменьшения расхода жидкости до нулевого значения при незначительном увеличении давления жидкости в трубопроводе. Для реализа-

ции способа используются два клапана, установленные по концам трубопровода, причем клапан в конце трубопровода с пропорциональным управлением, т.е. может по команде дискретно изменять свое проходное сечение. На практике более рационально устанавливать в конце трубопровода два клапана различного проходного сечения. Алгоритм рационального управления потоком жидкости при закрывании трубопровода (остановка потока) заключается в следующем. По команде на прекращение подачи жидкости из трубопровода закрывается клапан в начале трубопровода и уменьшается сечение клапана в конце трубопровода. Через $t=T/2$ клапан в конце трубопровода закрывается. Исследование динамических процессов в трубопроводе при управлении потоками жидкости по приведенному выше алгоритму (при $t=0, f_1=0; f_2=Df_{\max}$; при $t=T/2, f_1=0; f_2=0$) проводилось с помощью имитационной модели с начальными условиями полученными при исследовании установившегося потока жидкости (см. рис.2).

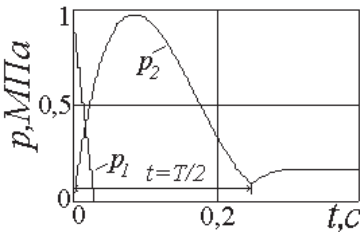


Рис.5. Изменения давления в трубопроводе при двухступенчатом закрывании сливного клапана с $D=0,068$ и $p_1=0$

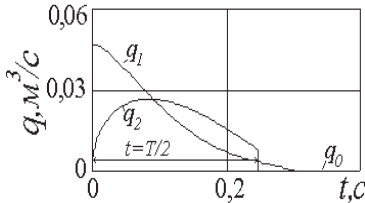


Рис.6. Изменения расходов жидкости в трубопроводе при двухступенчатом закрывании сливного клапана с $D=0,068$ и $p_1=0$

Результаты исследования приведены на рис.5,6. На рис.5 приведены кривые изменения давлений жидкости в начале p_1 и конце p_2 трубопровода. На рис.6 приведены кривые изменения расходов в начале q_0 , середине q_1 и конце q_2 трубопровода. Переходной процесс в трубопроводе при управлении потоками жидкости по рассматриваемому алгоритму протекает следующим образом. Начальные условия – поток жидкости стационарный с установившимися давлениями и расходами (рис.2). По команде на прекращение подачи жидкости через трубопровод закрывается на полное проходное сечение клапан установленный на входе в трубопровод. Одновременно частично (или полностью при наличии еще одного сливного клапана) закрывается на величину $f_{21}=Df_2$ сливной клапан, установленный в конце трубопровода. Оптимальной степенью закрывания клапана является $D=0,068$.

Закрывания клапанов происходят мгновенно. После закрывания клапанов давление жидкости в начале трубопровода начинает уменьшаться до нулевого значения. Расход жидкости в начале трубопровода имеет нулевое значение. Масса жидкости в трубопроводе начинает совершать колебательное движение (начинается перемещение волны давления), вызывая увеличение давления жидкости в конце трубопровода. Максимального

давления ($p_2 = 0,97 \text{ МПа}$) жидкость в конце трубопровода достигает через $T/4$. После закрывания клапанов расход жидкости в середине трубопровода q_1 начинает плавно уменьшаться; значение расхода жидкости в конце трубопровода q_2 мгновенно падает до величины обусловленной новым проходным сечением сливного клапана, затем увеличивается синхронно с увеличением давления p_2 в связи с увеличением перепада давлений на выходе из трубопровода, достигая $q_{2i} = 0,026 \text{ м}^3/\text{с}$, что приблизительно соответствует $q_{\text{уст.}}/2$. Затем значение расхода q_2 уменьшается синхронно с уменьшением давления p_2 .

Через время соответствующее $T/2$ от начала переходного процесса по команде полностью закрывается сливной клапан. К моменту закрывания значение давления p_2 уменьшается до $p_2 = 0,17 \text{ МПа}$; расход q_2 уменьшается до $q_{2i} = 0,0082 \text{ м}^3/\text{с}$. После закрывания сливного клапана расход $q_2 = 0$ и давление $p_2 = 0,17 \text{ МПа}$. Через $t = 1 \text{ с}$ после закрывания клапана значения давлений p_1 и p_2 уравниваются. Переходной процесс, вызванный прекращением подачи жидкости через трубопровод, завершается. Максимальное значение давления p_2 в первой фазе закрывания клапанов можно значительно уменьшить, практически до значения $p_2 = 0,02 \text{ МПа}$, увеличивая значение D . Установлено, что при значениях D выше оптимального (в данном случае $D = 0,068$) в момент полного закрывания сливного клапана в трубопроводе начинается новый переходной процесс с ростом давлений p_1 и p_2 до значений превышающих номинальное значение ($p = 1 \text{ МПа}$), что может вызвать гидроудар, хотя и меньший по величине давления, чем при мгновенном полном закрывании сливного клапана, но не позволяющий при необходимости начать новый процесс подачи жидкости через трубопровод. Кроме того, новый переходной процесс в трубопроводе длится более 3–4 с, что уменьшает эффект от использования быстродействующей запорной арматуры. Если принимать значение D меньше оптимального ($D < 0,068$), то максимальное давление в первой фазе закрывания сливного клапана увеличивается и переходной процесс затягивается.

Таким образом, установлено, что время выхода процесса транспортировки жидкости через трубопровод длиной 300 м и диаметром $d = 0,15 \text{ м}$, оборудованный на входе и выходе быстродействующими клапанами $D_u = 0,15 \text{ м}$ на устойчивый режим составляет $t = 0,35 \text{ с}$. Установившийся расход имеет значение $q_{\text{уст.}} = 0,046 \text{ м}^3/\text{с}$ при перепаде давлений на выходе $\Delta p = 0,014 \text{ МПа}$. Время выхода на установившийся режим и вид кривых изменения давлений и расходов одинаковы при пуске как пустого, так и заполненного жидкостью с давлением $p = 1 \text{ МПа}$ трубопровода.

Выводы. Разработаны математическая и имитационные модели переходных процессов в трубопроводе длиной 300 м и диаметром 0,15 м, снабженного источником постоянного давления и клапанами установленными в начале и конце трубопровода.

Исследован на имитационной модели переходной процесс выхода течения жидкости на установившийся стационарный режим при работе сис-

темы водоподачи по различным схемам, т.е. с различными начальными условиями.

Установлено, что мгновенное закрывание сливного клапана при установившемся движении жидкости в трубопроводе вызывает гидроудар с максимальным давлением $p_{\max}=3,3\text{МПа}$ и периодом колебаний массы жидкости $T=0,397\text{с}$ (время пробега фронта уплотнения жидкости (волны) составляет $t=0,438\text{с}$). При гидроударе наблюдается зона кавитационных явлений ($p<0$).

Установлено, что при полном закрывании клапана в начале трубопровода с одновременным частичным и последующим, через $t=T/2\text{с}$, полным закрыванием клапана в конце трубопровода, максимальное давление жидкости в трубопроводе не превышает значения источника давления $p=1\text{МПа}$. Такой режим работы возможен при оптимальном значении параметра D (относительной площадью открытой части сечения запорного клапана).

Показано, что при значениях D больше оптимального (в данном случае $D=0,068$) в момент полного закрывания клапана в трубопроводе начинается новый переходной процесс с ростом давлений p_1 и p_2 до значений, превышающих номинальное значение ($p=1\text{МПа}$), что может вызвать гидроудар, хотя и меньший по величине давления, чем при мгновенном полном закрывании сливного клапана, но не позволяющий при необходимости начать новый процесс подачи жидкости через трубопровод. Если значение D меньше оптимального ($D<0,068$), то максимальное давление в первой фазе закрывания сливного клапана увеличивается и переходной процесс затягивается.

Установлено, что применение двухступенчатого способа управления потоком жидкости с использованием в составе системы водоснабжения быстродействующих клапанов, обеспечивает реализацию всех возможных операций системы, в том числе и циклическую работу установок с минимальной потерей (не более $0,01-0,015\text{м}^3$) жидкости.

1. Бибик Г.А., Иоффе А.М., Праздников А.В., Староселецкий М.И. Производство железнодорожных колес – М.: Металлургия, 1982. – 232с.
2. Полухин П.И., Грдина Ю.В., Зарвин Е.Я. Прокатка и термическая обработка железнодорожных рельсов – М.: Металлургиздат, 1962. – 510с.
3. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Шичков А.Н., Грачев А.В. Совершенствование теплового процесса листовой прокатки – М.: Металлургия. 1973. – 304с.
4. Оборудование цехов с пилигримовыми трубопрокатными установками / С.Н.Кожевников, А.В.Праздников, А.М.Иоффе и др. – М.: Металлургия, 1974. – 256с.
5. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных цехов – М.: Металлургия, 1965. – 515с.

6. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Влияние компенсатора гидроударов на динамику гидропривода // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – №3. – 2008. – С.89 – 93.
7. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Новая тенденция в управлении гидромеханическими системами // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. научн. тр. ИЧМ.– Вып.15.– 2007, С.231–239.
8. *Большаков В.И., Вулых А.Ю.* Математическая модель протяженного трубопровода в гидромеханической системе переменной структуры // *Машиноведение*, 1989.– №6.– С.96–99.
9. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Особенности адаптации дискретных имитационных моделей гидросистем // *Подъемно–транспортная техника*, №3–4, 2002, С.49–59.
10. *Гийон М.* Исследование и расчет гидравлических систем // М.: Машиностроение, 1964. – 338с.
11. *Угинчус А.А.* Гидравлика и гидравлические машины // Изд-во Харьковского университета, Харьков, 1970 – 395с.
12. *Вишне夫斯基 К.П.* Переходные процессы в напорных системах водоподачи – М.: Агропромиздат, 1986. – 135с.

*Статья рекомендована к печати
канд. техн. наук В.В.Веревым*

В.І.Большаков, І.Б.Листопадов

Особливості перехідних процесів при поетапному управлінні потоком рідини в трубопроводі

Метою роботи є дослідження перехідних процесів при поетапному управлінні потоком рідини в трубопроводі гідросистеми водопостачання установок охолодження прокату. Показано, що використання двухетапного закривання клапана з тривалістю першої ступіні рівної часу пробігу фронту тиску по довжині трубопроводу й оптимального значення першої ступіні зменшує тиск при гідроударі до припустимого значення та зменшує час перехідного процесу.