

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЖЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗВРАТА ДРЕНАЖНЫХ УТЕЧЕК ЗАКРЫТОЙ ГИДРОПЕРЕДАЧИ

*Базанов С.А.<sup>1</sup>, Анферов В.Н.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>ООО Вaлсиб, Новосибирск;*

*<sup>2</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск*

**Ключевые слова:** долговечность гидропривода, чистота рабочей жидкости, закрытая гидropередача, эжекторный насос, возврат дренажных утечек, регулировка коэффициента эжекции, линейный привод.

**Аннотация.** Предметом исследования является закрытая гидropередача с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса. Целью работы является разработка гидropередачи, изолированной от атмосферного воздуха, повышающей надежность и долговечность гидропривода. Проведен обзор гидроприводов и тенденций их развития. Показана степень влияния чистоты рабочей жидкости на надежность машин. Предложена принципиальная схема закрытой гидropередачи и изготовлен стенд для ее исследования. Описаны особенности конструкции стенда, его возможности, программа и методика проведения испытаний. Особое внимание уделяется определению параметров системы возврата дренажных утечек. Для более широкого диапазона исследований разработана конструкция эжекторного насоса со сменной проточной частью и иглой, регулирующей коэффициент эжекции. Показан алгоритм определения соотношений основных геометрических характеристик эжектора и диапазона регулировки. Предложена электронная система управления перемещением регулировочной иглы. Представлен листинг программы управления работой эжектора. Проведенное исследование показывает возможность применения эжекторного насоса в условиях переменного давления рабочего потока для поддержания давления в дренажной линии в заданном диапазоне.

## THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE EJECTOR SYSTEM FOR RETURNING DRAINAGE LEAKS IN A CLOSED HYDRAULIC TRANSMISSION

*Bazanov S.A.<sup>1</sup>, Anferov V.N.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>LLC Valsib, Novosibirsk,*

*<sup>2</sup>Siberian Transport University, Novosibirsk*

**Keywords:** durability of hydraulic drive, purity of the working fluid, closed hydraulic transmission, ejector pump, return of drainage leaks, adjustment of the ejection coefficient, linear drive.

**Abstract.** The subject of this study is a closed hydraulic transmission with an accumulator to maintain overpressure in the pump's suction line. The aim is to develop a hydraulic transmission isolated from atmospheric air, thereby increasing the reliability and durability of the hydraulic drive. A review of hydraulic drives and their development trends has been conducted, demonstrating the significant impact of working fluid purity on machine reliability. A schematic diagram of a closed hydraulic transmission has been proposed, and a test stand has been constructed for its evaluation. The design features, capabilities, program, and test procedure of the stand are described in detail. Special attention is given to determining the parameters of the drainage leak return system. For a broader range of studies, an ejector pump with a replaceable flow part and an adjustable needle regulating the ejection coefficient has been developed. An algorithm for determining the ratios of the main geometric characteristics of the ejector and its adjustment range is provided. An electronic control system for the movement of the adjusting needle is proposed, along with a listing of the ejector operation management program. The research conducted demonstrates the feasibility of using an ejector pump under variable working flow pressure conditions to maintain pressure in the drainage line within a specified range.

**Введение.** Развитие современных машин и механизмов связано с совершенствованием приводов и их исполнительных органов, в первую очередь с широким внедрением гидравлического привода [1].

Благодаря своим преимуществам, гидравлический привод находит все большее применение в строительном машиностроении, станкостроении, подъемно-транспортных машинах и механизмах, в различных типах горных машин.

Основными тенденциями развития гидроприводов являются: повышение рабочего давления; интенсивное применение гидроприводов с электронными системами управления; применение насосов и гидроаппаратов со встроенной электроникой; создание интегральных схем (специальных гидроблоков с использованием компактной гидроаппаратуры); расширение номенклатуры; унификация; использование компьютерного проектирования; улучшение эксплуатационных показателей. Особое внимание уделяется повышению надежности машин.

Большое влияние на долговечность и надежность гидроприводов машин оказывает чистота рабочей жидкости. Известно, что как минимум 75% неисправностей и 50% простоев мобильных машин обусловлены наличием загрязняющих частиц в гидрожидкости [2, 3]. Эти частицы могут вызывать износ компонентов, забивание фильтров, снижение эффективности и, в конечном итоге, выход из строя системы.

Особенно остро эта проблема стоит для машин, работающих в условиях повышенной запыленности окружающего воздуха. Постоянное повышение энерговооруженности машин диктует необходимость применения современных гидроагрегатов, весьма чувствительных к загрязнению. Поэтому все большее внимание уделяется качественным показателям и чистоте рабочей жидкости гидроприводов.

Косвенным доказательством проблемы чистоты рабочих жидкостей является то, что мировой рынок фильтрационных технологий в секторе мобильной техники возрастает на 20-25% ежегодно [2].

Загрязнения можно разделить на пять групп: воздух, вода, твердые частицы, мягкие частицы и химические загрязнения. Каждая из групп оказывает различное влияние на долговечность гидросистемы.

Загрязнители попадают в систему в процессе износа деталей, во время технического обслуживания и ремонта, через уплотнения гидроцилиндров, но их основной объем проникает через горловину бака во время работы.

Гидроприводы делятся на три группы по схеме циркуляции жидкости: открытые – с разомкнутой циркуляцией, закрытые – с замкнутой циркуляцией и гибридные [4,5].

В современных машинах большое распространение получили открытые гидропередачи, в которых гидравлический бак связан с атмосферой. Во время работы гидроцилиндров из-за разности объемов поршневых и штоковых полостей объем жидкости в баке замещается загрязненным атмосферным воздухом. За многократное количество циклов работы машины этот объем может достигать достаточно больших значений.

Уменьшить негативное влияние атмосферного воздуха можно изоляцией рабочей жидкости. В закрытых гидропередачах жидкость циркулирует по замкнутому контуру и не имеет связи с атмосферой. Они широко применяются в авиации и существенно увеличивают долговечность и надежность, но сложность исполнения схем не позволяет в полной мере их применить в гидроприводе наземных машин.

Закрытые гидропередачи активно используются в системах с гидродвигателями вращательного действия. Но такая система изолирует рабочую жидкость частично, так как при снижении объемного КПД через подпиточный бак, соединенный с атмосферой может проходить до 40% рабочей жидкости [4, 6, 7].

В системах с гидродвигателями поступательного движения применяются гибридные открыто-закрытые схемы и закрытые схемы с использованием герметичных гидробаков. Такие баки имеют более сложную и дорогую в изготовлении конструкцию. Возврат дренажных утечек обеспечен подпиточным контуром, снижающим КПД системы.

Для более широкого применения закрытых гидропередач в машинах различного типа ведутся работы по их разработке и внедрению, но недостатки существующих схем определяют необходимость более детального решения этой задачи.

Закрытая гидропередача должна выполнять следующие функции: обеспечение изоляции рабочей жидкости от атмосферного воздуха; работоспособность с гидродвигателями как вращательного, так и поступательного действия; возврат дренажных утечек в систему без использования подпиточного контура, соединенного с атмосферой; поддержание

избыточного давления во всасывающей линии насоса; компенсация температурных колебаний объемов рабочей жидкости.

**Материалы и методы исследований.** На основе принципиальной схемы (рис. 1) разработан и изготовлен стенд (рис. 2) для исследования закрытой гидропередачи [8, 9]. Основной целью исследования является проверка работоспособности и определение оптимальных характеристик основных элементов, играющих главную роль в стабильной работе закрытой гидропередачи:

- пневмогидроаккумулятора, поддерживающего избыточное давление в системе в заданном диапазоне и вмещающего в себя температурные и цилиндрические объемы приращения жидкости;

- эжекторного насоса, обеспечивающего возврат дренажа в систему и подпорное давление во всасывающей линии насоса.

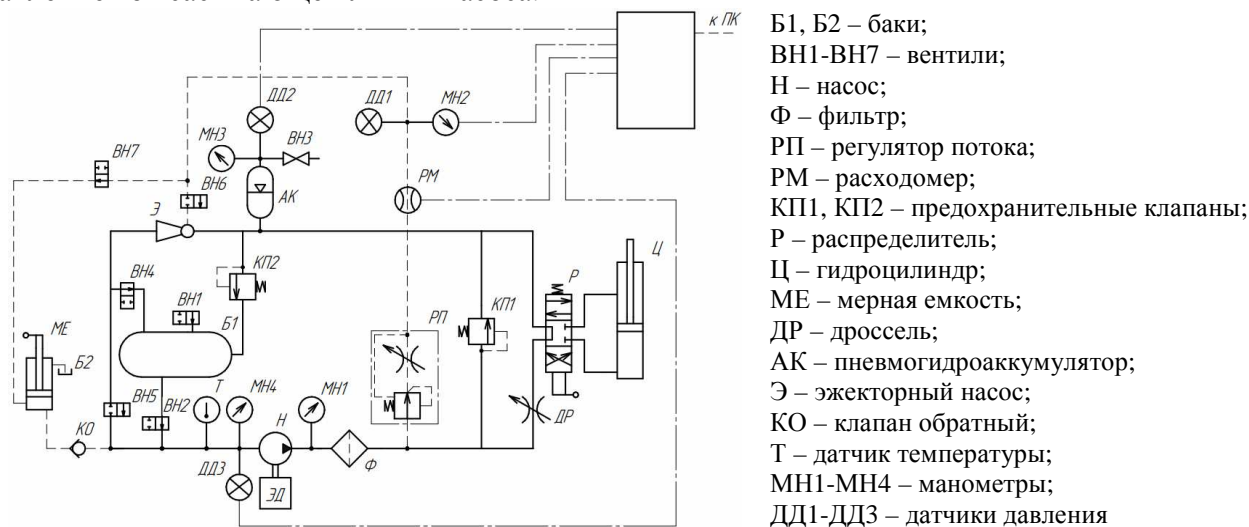


Рис. 1. Принципиальная схема стенда закрытой гидропередачи



Рис. 2. Фотография стенда для исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса

Конструкция стенда позволяет провести исследования с гидродвигателями вращательного и поступательного действия с различными объемами поршневых и штоковых полостей, что дает возможность проверить применимость закрытой гидропередачи для различных типов машин. Подбор характеристик пневмогидроаккумулятора проводится из

условия вмещения необходимого объема цилиндрических и температурных перепадов объемов жидкости, а также из условия обеспечения подпорного давления во всасывающей линии с учетом потерь на эжекторе. Для проверки работоспособности гидропередачи при различных расходах дренажа в стенде установлен регулятор потока, направляющий часть основного потока жидкости в линию, имитирующую дренажные утечки. Их объем контролируется проточным расходомером. С помощью энергии сливного потока в эжекторе происходит вовлечение дренажного потока за счет сил, действующих на поверхности струи, выходящей из сопла [10]. Эжекторный насос выполнен со сменной проточной частью для проведения исследований в различных режимах входных и выходных давлений и расходов. Для визуального контроля давлений в сливной, дренажной и всасывающей линии установлены манометры.

С целью снятия показаний давлений и записи результатов испытаний на стенде установлены датчики давления, которые через аналого-цифровой преобразователь передают данные на ПК для последующего анализа и обработки.

Для проведения исследований разработаны программа и методика испытаний.

Методика состоит из четырех этапов, для каждого из которых разработаны алгоритмы: подготовки к работе; испытания при нулевых дренажных утечках, испытания при максимально допустимых утечках, испытания при промежуточных объемах дренажа. После замера максимального расхода дренажных утечек, при которых система работает стабильно, определяется шаг контрольных расходов. Для этого максимальный расход делится на 10 и для каждого промежуточного значения проводятся испытания [11]. Испытания проводятся при +20°C и при установившейся температуре рабочей жидкости +60°C. Согласно регламенту ГОСТ 17108-86, общее число экспериментов исследования составляет 160 испытаний.

**Результаты.** Эжекторный насос в данной схеме установлен после пневмогидроаккумулятора и работает в условиях переменного давления рабочего потока.

Одним из условий расчета эжектора является поддержание избыточного давления в заданном диапазоне во всасывающей линии основного насоса (на выходе из эжектора). Другой задачей эжекторного насоса является обеспечение возврата дренажных утечек в систему, находящуюся под избыточным давлением, не вызывая превышения максимально допустимого давления дренажа и не создавая разрежения в дренажной линии.

В основе расчёта эжекторного насоса лежит определение его геометрических параметров, в первую очередь диаметров сопла и горловины. Отношение этих диаметров позволяет изменять отношение давлений на входе и выходе из эжектора. Расчет эжекторного насоса проводится с помощью уравнения нормальных безразмерных гидравлических характеристик [12]:

$$(P_{out}^e - P_{dr}^e) / (P_{wf}^e - P_{dr}^e) = \varphi_1^2 \frac{d_C^2}{d_r^2} \left[ 2\varphi_2 + \left( 2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{(d_C^2 / d_r^2) u^2}{1 - (d_C^2 / d_r^2)} - (2 - \varphi_3^2) \frac{d_C^2}{d_r^2} (1 + u)^2 \right], \quad (1)$$

где  $(P_{out}^e - P_{dr}^e) / (P_{wf}^e - P_{dr}^e)$  – безразмерный перепад гидростатических давлений;  $P_{out}^e$  – давление после эжекторного насоса;  $P_{dr}^e$  – давление подсосываемого потока;  $P_{wf}^e$  – давление рабочей жидкости;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – коэффициенты скоростей сопла, диффузора, входа в камеру смешения;  $d_C$  – диаметр сопла;  $d_r$  – диаметр горловины;  $u$  – коэффициент эжекции.

Обобщенные нормальные гидравлические характеристики гидроструйных насосов с центральным соплом при различных соотношениях перепадов давлений и диаметров горловины и сопла, рассчитанные по методике [12], представлены на рисунке 3 [13].

Представленный график (рис. 3) может служить инструментом для выбора геометрических параметров эжектора. Для этого строится целое семейство кривых, соответствующих различным коэффициентам эжекции. Зная перепад абсолютных гидростатических давлений и желаемый коэффициент эжекции, можно определить оптимальное соотношение диаметров горловины и сопла.

Для расчета параметров требуемого эжекторного насоса закрытой гидропередачи определенной машины необходимо, учитывая рекомендации завода-изготовителя, определить допустимые значения давлений дренажа и во всасывающей линии, а также рассчитать максимальный объем цилиндрических и температурных приращений рабочей жидкости в сливной линии. Исходя из этих данных, предварительно определяются характеристики ПГА, от которых зависят давление и расход рабочего потока эжектора, подсосываемого и выходного потока.

График на рисунке 4 позволяет оценить работу эжекторного насоса для частного случая закрытой гидропередачи с безразмерным перепадом гидростатических давлений равным 0,125 и значениями коэффициента эжекции  $u = 0,052$ ;  $0,177$  и  $0,316$ . На графике (рис. 4) показано, как следует корректировать соотношение  $d_r/d_c$  при различных значениях  $\Delta p_c/\Delta p_p$ , чтобы коэффициент эжекции  $u$  оставался неизменным. Кроме того, график дает возможность оценить эффективность работы струйного насоса: в области, где наблюдается максимальный перепад давлений, достигается наивысший КПД эжекторного насоса. Для расчетов системы регулировки коэффициента эжекции рекомендуется использовать правую часть кривой графика, поскольку в левой части характеристики графика довольно крутые, и даже небольшие изменения в соотношении  $d_r/d_c$  могут вызвать резкие колебания перепада давлений  $\Delta p_c/\Delta p_p$ , что в свою очередь приводит к нестабильной работе насоса.

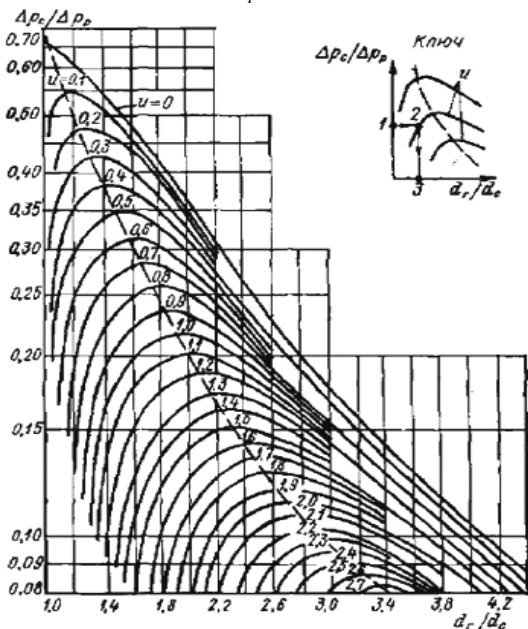


Рис. 3. Обобщенные нормальные гидравлические характеристики гидроструйных насосов с центральным соплом

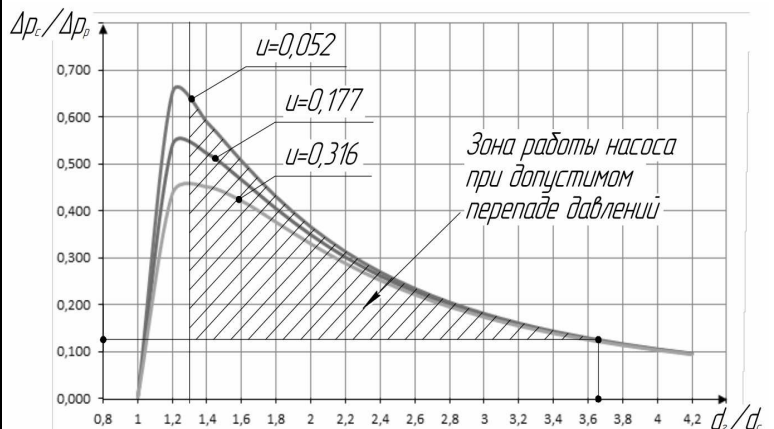


Рис. 4. Обобщенные гидравлические характеристики эжекторного насоса закрытой гидропередачи с безразмерным перепадом абсолютных гидростатических давлений  $\Delta p_c/\Delta p_p = 0,125$

Чтобы обеспечить требуемый коэффициент эжекции при изменении давления рабочего потока  $p_{wf}$ , в конструкции насоса предусмотрена регулировочная игла, способная изменять соотношение  $d_r/d_c$  (в частном случае, показанном на рисунке 4 в диапазоне от 1,3 до 3,65). Также игла выполняет функцию корректировки коэффициента эжекции при увеличении объема дренажных утечек, возникающих вследствие износа основного насоса системы.

Для поддержания давления в дренажной линии в заданном диапазоне на основе [14] разработана система управления регулировочной иглой представленная на рисунке 5.

Во время работы системы датчик давления 7 в постоянном режиме с заданной частотой опроса передает сигнал на АЦП 8. Если давление в дренажной линии находится в заданных пределах, шаговый двигатель выключен. Если давление в дренажной линии приближается к

максимально или минимально допустимому, АЦП 8 подает сигнал на драйвер двигателя 9, который запускает вращение вала двигателя. Вращение передается на шарико-винтовую пару, к гайке которой закреплен шток механизма линейного перемещения 5. Шток, в свою очередь, соединен с регулирующей иглой 4. Перемещение иглы изменяет соотношение  $d_r/d_c$  и коэффициент эжекции.

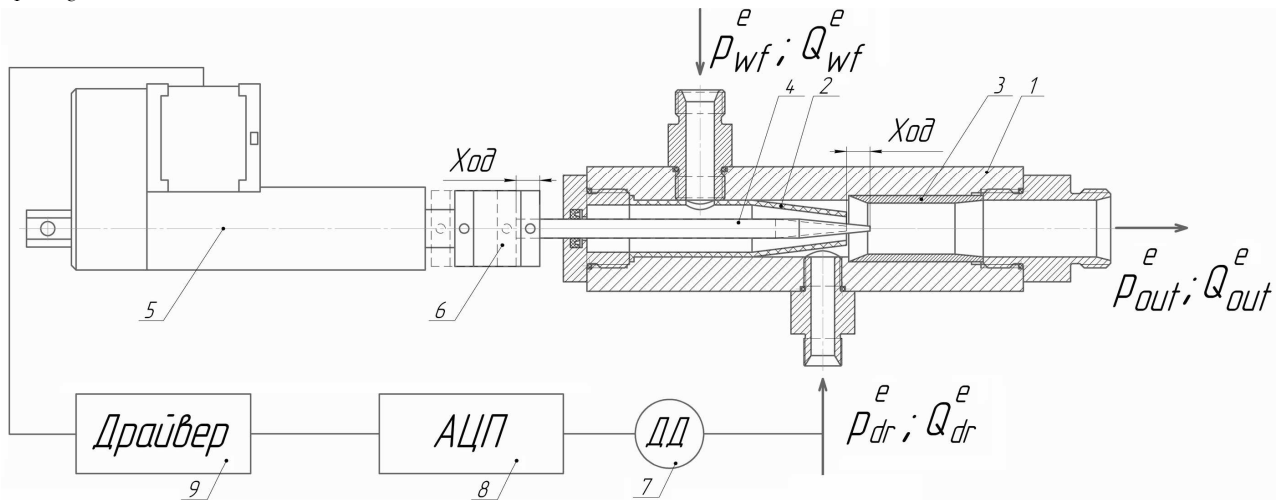


Рис. 5. Электронная система управления коэффициентом эжекции:

- 1 – корпус эжектора; 2 – сопло; 3 – сменная проточная часть; 4 – регулировочная игла;
- 5 – линейный привод; 6 – соединительная муфта; 7 – датчик давления;
- 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – драйвер шагового двигателя

Направление вращения и ход перемещения иглы зависят от характеристик гидropередачи и параметров эжекторного насоса.

Для стабильной работы закрытой гидropередачи разработана программа настройки, калибровки и управления системой регулировки эжекторного насоса.

Система управления дренажным насосом состоит из следующих компонентов:

- 1) электронный блок на основе микроконтроллера STM32F103C8T6;
- 2) шаговый электродвигатель MT-1704HS1800A;
- 3) драйвер управления шаговым электродвигателем;
- 4) концевые выключатели для отслеживания крайних положений гайки шарико-винтовой пары для отключения шагового двигателя и предотвращения его перегрева;
- 5) аналоговый датчик давления жидкости/газа НК1100;
- 6) источник питания электронного блока и шагового электродвигателя.

Программное обеспечение разработано в среде IAR Embedded Workbench.

Алгоритм работы встроенного программного обеспечения микроконтроллера включает:

- инициализацию периферии микроконтроллера;
- непрерывный цикл мониторинга давления жидкости в дренажной магистрали;
- управление шаговым двигателем на основе измеренного давления.

Для стабильной работы закрытой гидropередачи разработана программа настройки, калибровки и управления системой регулировки эжекторного насоса. Листинг раздела цикла мониторинга программы управления представлен на рисунке 6.

Для удобства работы, введения параметров и отслеживания правильности задания функций разработан интерфейс (рис. 7) взаимодействия с программным обеспечением.

Интерфейс программы имеет шесть основных блоков: регулировки скорости вращения двигателя; задания направления вращения; функциональный блок; введения пределов давления; калибровки датчика давления; диалоговое окно.

Наличие этих блоков позволяет быструю перенастройку системы регулировки на различные режимы работы эжектора.

```

//Цикл мониторинга
void ACTION_Monitoring()
{
    //-----
    //Инициализация мониторинга (светодиод горит)
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
    GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_13;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLDOWN;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
    HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_13, GPIO_PIN_RESET);
    //-----
    //Настройка концевых выключателей
    //В0 - крайнее открытое положение (белый)
    //В1 - крайнее закрытое положение (черный)
    GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_0|GPIO_PIN_1;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLUP;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
    HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);
    //-----
    STEPMOTOR_Stop();
    HAL_Delay(100);
    SETTINGS_Config(Config);
    SETTINGS_ReadConfig(&Config);
    STEPMOTOR_SetStepFrequency(Config.StepFrequency);
    //-----
    while(1)
    {
        STEPMOTOR_State MotorState = STEPMOTOR_GetState();
        //-----
        //Мониторинг давления
        int32_t CurrentPressure = SENSOR_GetPressure();
        //-----
        //Если давление меньше нижнего лимита, выключаем двигатель
        if (CurrentPressure < Config.MinPressure)
        {
            GPIO_PinState LimitSwitchState_Close = HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_1);
            if (LimitSwitchState_Close == GPIO_PIN_RESET)
            {
                STEPMOTOR_Stop();
            }
            else
            {
                if (Config.Direction == 0)
                {
                    if (MotorState != STEPMOTOR_Works_CounterClockwise)
                    {
                        HAL_Delay(100);
                        STEPMOTOR_Start(STEPMOTOR_DirectionCounterClockwise);
                    }
                }
            }
        }
        //-----
        //Если давление выше верхнего лимита, выключаем двигатель с реверсом
        if (CurrentPressure > Config.MaxPressure)
        {
            GPIO_PinState LimitSwitchState_Open = HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_0);
            if (LimitSwitchState_Open == GPIO_PIN_RESET)
            {
                STEPMOTOR_Stop();
            }
            else
            {
                if (Config.Direction == 0)
                {
                    if (MotorState != STEPMOTOR_Works_Clockwise)
                    {
                        HAL_Delay(100);
                        STEPMOTOR_Start(STEPMOTOR_DirectionClockwise);
                    }
                }
                else
                {
                    if (MotorState != STEPMOTOR_Works_CounterClockwise)
                    {
                        HAL_Delay(100);
                        STEPMOTOR_Start(STEPMOTOR_DirectionCounterClockwise);
                    }
                }
            }
        }
        //-----
        //Если давление в заданном диапазоне останавливаем двигатель
        if ((CurrentPressure > Config.MinPressure) && (CurrentPressure < Config.MaxPressure))
        {
            if (MotorState == STEPMOTOR_Stopped)
            {
                STEPMOTOR_Stop();
            }
        }
    }
}

```

Рис. 6. Листинг раздела цикла мониторинга программы управления регулировочной иглы эжекторного насоса

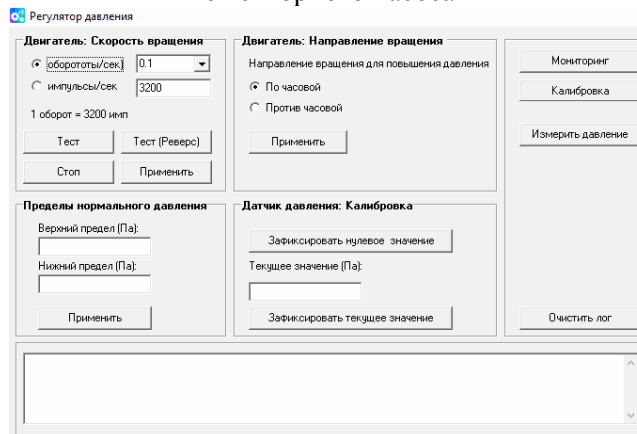


Рис. 7. Интерфейс программы управления регулировкой эжекторного насоса

**Заключение.** На основании обзора групп гидроприводов по циркуляции жидкости и влияния чистоты рабочей жидкости на надежность и долговечность гидропривода машин обоснована актуальность применения закрытой гидropередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления в системе и эжекторным возвратом дренажных утечек. Представлены принципиальная схема исследовательского стенда, его физическая модель, программа и методика испытаний. Разработана система возврата дренажных утечек с помощью эжекторного насоса, работающего в условиях переменного давления рабочего и дренажного потоков. Представлен алгоритм определения основных геометрических параметров эжектора и диапазона регулировки. Для поддержания заданного давления дренажа применена электронная система управления изменения соотношения диаметров сопла и горловины эжекторного насоса. Разработана программа управления системой регулировки. Проведенное исследование закрытой гидropередачи подтверждает ее актуальность и работоспособность в гидроприводах машин.

#### Список литературы

1. Галдин Н.С., Семенова И.А. Гидравлические элементы мобильных машин. – Омск.: РИО ИПЦ СибАДИ, 2016. – 231 с.
2. Бродский Г.С. Обоснование, выбор параметров и разработка систем фильтрации рабочих жидкостей для гидрофицированных горных машин: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – М.: Национальный научный центр горного производства Институт Горного Дела им. А.А. Скочинского, ЗАО «Могормаш», 2006. – 13 с.
3. Chen M., Zhao D. The gravitational potential energy regeneration system with closed-circuit of boom of hydraulic excavator // Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, vol. 82, pp. 178-192. doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.05.017.
4. Bury P., Stosiak M., Urbanowicz K., Kodura A., Kubrak M., Malesińska A. A Case Study of Open- and Closed-Loop Control of Hydrostatic Transmission with Proportional Valve Start-Up Process // Energies, 2022, no. 15(5), p. 1860. doi.org/10.3390/en15051860.

5. Singh V.P., Pandey A.K., Dasgupta K. Steady-state Performance Investigation of Closed-Circuit Hydrostatic Drive Using Variable Displacement Pump and Variable Displacement Motor // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2021, vol. 235(2), pp. 249-258. DOI: 10.1177/0954408920953662.
6. Choi J., Kim H., Yu S., Yi K. Development of integrated controller for a compound hybrid excavator // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011, vol. 25, pp. 1557-1563. DOI: 10.1007/s12206-011-0333-z.
7. Azzam I., Pate K., Garcia-Bravo J., Breidi F. Energy Savings in Hydraulic Hybrid Transmissions through Digital Hydraulics Technology // Energies. 2022, no. 15(4), p. 1348. doi.org/10.3390/en15041348.
8. Патент №195330 РФ. Гидравлическая передача / С.А. Базанов. – Заявка № 2019136888 от 18.11.2019; опубл. 23.01.2020, Бюл. №3.
9. Патент №205557 РФ. Стенд для изучения работы гидропривода / С.А. Базанов, В.Н. Анферов. – Заявка №2021111008 от 19.04.2021, опубл. 27.20.2021, Бюл. №20.
10. Аронс Г.А. Струйные аппараты: Теория и расчет. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 139 с.
11. Базанов С.А., Анферов В.Н. Методика исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса // iPolytech Journal. – 2023. – Т. 27, №3. – С. 462-471. – doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-462-471.
12. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
13. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 256 с.
14. Патент № 2426916 РФ. Регулируемый эжектор / А.-Г.Г. Керимов, А.А. Иванов, А.Ф. Керимов. – Заявка №2009147853/06 от 22.12.2009, опубл. 27.06.2011, Бюл. №18.

### References

1. Galdin N.S., Semenova I.A. Hydraulic elements of mobile machines. – Omsk: EPD PPC Siberian state automobile and road university, 2016. – 231 p.
2. Brodsky G.S. Justification, selection of parameters and development of working fluid filtration systems for hydrofected mining machines: Abstract of the diss. ... doct. of tech. sc. – М.: National Scientific Center of Mining Production A.A. Skochinsky Institute of Mining, Mogormash CJSC, 2006. – 13 p.
3. Chen M., Zhao D. The gravitational potential energy regeneration system with closed-circuit of boom of hydraulic excavator // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017, vol. 82, pp. 178-192. doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.05.017.
4. Bury P., Stosiak M., Urbanowicz K., Kodura A., Kubrak M., Malesińska A. A Case Study of Open- and Closed-Loop Control of Hydrostatic Transmission with Proportional Valve Start-Up Process // Energies. 2022, no. 15(5), p. 1860. doi.org/10.3390/en15051860.
5. Singh V.P., Pandey A.K., Dasgupta K. Steady-state Performance Investigation of Closed-Circuit Hydrostatic Drive Using Variable Displacement Pump and Variable Displacement Motor // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2021, vol. 235(2), pp. 249-258. DOI: 10.1177/0954408920953662.
6. Choi J., Kim H., Yu S., Yi K. Development of integrated controller for a compound hybrid excavator // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011, vol. 25, pp. 1557-1563. DOI: 10.1007/s12206-011-0333-z.
7. Azzam I., Pate K., Garcia-Bravo J., Breidi F. Energy Savings in Hydraulic Hybrid Transmissions through Digital Hydraulics Technology // Energies. 2022, no. 15(4), p. 1348. doi.org/10.3390/en15041348.
8. Patent No. 195330 RU. Hydraulic transmission / S.A. Bazanov. – Appl. No 2019136888 from 18.11.2019; publ. 23.01.2020, Bul. No. 3.
9. Patent No. 205557 RU. Stand for studying the operation of a hydraulic drive / S.A. Bazanov, V.N. Anferov. – Appl. No. 2021111008 from 19.04.2021, publ. 07.20.2021, Bul. No. 20.
10. Arons G.A. Jet devices: Theory and calculation. – М.: Gosenergoizdat, 1948. – 139 p.
11. Bazanov S.A., Anferov V.N. Method for investigating closed-loop hydraulic transmission with accumulator maintenance of overpressure in the suction line of a pump // iPolytech Journal. 2023, vol. 27, no. 3, pp. 462-471. doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-462-471.
12. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Jet devices. – 3rd ed., reprint. – М.: Energoatomizdat, 1989. – 352 p.
13. Lyamaev B.F. Hydraulic jet pumps and installations. – L.: Mechanical engineering. Leningrad Department, 1988. – 256 p.
14. Patent No. 2426916 RU. Adjustable ejector / A.-G.G. Kerimov, A.A. Ivanov, A.F. Kerimov. – Appl. No. 2009147853/06 from 22.12.2009, publ. 27.06.2011, Bul. No. 18.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Базанов Сергей Александрович</b> – заместитель директора по развитию	<b>Bazanov Sergey Aleksandrovich</b> – deputy director for development
<b>Анферов Валерий Николаевич</b> – доктор технических наук, профессор кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины»	<b>Anferov Valery Nikolaevich</b> – doctor of technical sciences, professor of the Department of lifting and transport, track, construction and road machinery
bazanoffsa@yandex.ru	

Получена 20.06.2024