

УДК 621.695:622.276

В.Е. Кириченко, А.В. Романюков, А.А. Татуревич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУДАРА ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ В ГЛУБОКОВОДНЫХ ГИДРОПОДЪЕМАХ

Розроблено методику та програмні засоби визначення характеристик швидких нестационарних процесів при перехідних режимах в транспортному трубопроводі глибоководного ерліфта. Визначено оптимальні параметри швидкості спрацьовування запірно-регулюючої арматури при перехідних режимах в елементах глибоководних ерліфтних гідропідйомів, що є початковими даними для побудови алгоритмів керування глибоководними добувними комплексами.

Разработаны методика и программные средства определения характеристик быстрых нестационарных процессов при переходных режимах в транспортном трубопроводе глибоководного эрлифта. Определены оптимальные параметры быстрогодействия запорно-регулирующей арматуры при переходных режимах в элементах глибоководных эрлифтных гидроподъемов, являющиеся исходными данными для построения алгоритмов управления глибоководными добычными комплексами.

The technique and software of definition of characteristics of fast non-stationary processes are developed at transitive modes in the transport pipeline of a deep-water airlift. Optimum parameters of regulating armature speed are defined at transitive modes in elements of deep-water airlifts, being the initial data for construction of algorithms of deep-water extraction complexes.

Введение. В связи с дефицитом некоторых цветных металлов, добываемых традиционным способом из континентальных месторождений, особое внимание заслуживают работы, направленные на освоение рудных месторождений Мирового океана. Решением совета национальной безопасности и обороны Украины от 16 мая 2008 года «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави», приведенным в действие Указом Президента Украины № 463/2008 от 20 мая 2008 года, предусмотрена разработка новой «Национальной программы дослідження та використання ресурсів Азово-Чорноморського басейну, інших районів Світового океану на 2009-2034 роки». Исследования ученых, занимающихся развитием этой новой ветви горного дела, сконцентрированы на создании эффективных способов и средств добычи, транспортирования и переработки минерального сырья. В плане

транспортировки добытых твердых полезных ископаемых на базовое плавсредство специалисты выделяют конкурирующие на сегодняшний день эрлифтный и насосный варианты гидроподъема. Опыт их эксплуатации в шахтных условиях показывает, что в различных нештатных (аварийных) ситуациях, а также переходных режимах, работа установок часто сопровождается быстрыми нестационарными процессами, среди которых наиболее опасным в плане целостности и работоспособности оборудования является гидроудар. Дополнительные трудности возникают при эксплуатации горного оборудования в сложных условиях больших глубин в связи с жесткими требованиями, предъявляемыми к работоспособности и живучести трубного става (ТС) гидроподъема, силовых агрегатов, запорно-регулирующей арматуры и др.

Данная статья посвящена **актуальной научной проблеме** – разработке эффективных способов и средств гидроподъема минерального сырья в составе горно-морских предприятий при освоении рудных месторождений Мирового океана.

Трубный став является несущей конструкцией для всего подводного оборудования и, ввиду больших протяженностей и массогабаритов, характеризуется опасными на разрыв продольными статическими напряжениями. При движении судна-носителя конструкция ТС со свободным ходовым концом принимает изогнутую деформированную неравновесную форму и испытывает динамические нагрузки, обусловленные волновой качкой, а также различными видами аэрогидроупругой неустойчивости со стороны окружающей морской среды (эоловы колебания, галопирование, флаттер). Кроме того, возможны потери дивергентной устойчивости ТС и возникновение параметрического резонанса вследствие взаимодействия со стационарным и пульсирующим потоком транспортируемой жидкости. Поэтому минимизация дополнительных динамических напряжений, связанных с гидроударом, является **актуальной задачей** в плане обеспечения целостности и работоспособности конструкций.

Практически во всех известных на сегодняшний день работах, посвященных методам расчета эрлифтов, рассматриваются только установившиеся рабочие режимы установок и не рассматриваются нестационарные и переходные процессы. Исключениями являются отдельные работы. В [1] приведено математическое описание процессов запуска и останова односмесительного глубоководного эрлифтного гидроподъема (ГЭГ), в котором глубина погружения смесителя, ввиду ограниченности развиваемых имеющимися компрессорами давлений, не обеспечивает эксплуатацию гидроподъема в оптимальном по энергоемкости режиме. В [2] предложен способ запуска многосмесительного эрлифта, где глубина погружения нижнего смесителя соответствует параметрам оптимального режима, однако характеризуется низкой надежностью, многочисленностью пусковых операций и большой продолжительностью.

В работах [3, 4] рассмотрены особенности создания экспериментальной АСУ в плане совместной работы машиностроителей и специалистов по системам управления и предложен блочно-иерархический подход к разработке технологии управления глубоководными добычными комплексами. На основе анализа результатов этих работ сформулированы основные требования к запуску ГЭГ в контексте требований к разрабатываемой экспериментальной АСУ, в соответствии с которыми разработан способ запуска ГЭГ непосредственно на смесителе, глубина погружения которого превосходит максимальный напор, развиваемый компрессором [5].

На рис. 1 приведено схематическое изображение экспериментального ГЭГ и оборудования донного блока. Эрлифтная установка состоит из транспортного трубопровода (ТТ) 1, компрессора (компрессорной станции) 2, смесителя 3 и воздухопровода 4. ТТ условно разделяется на две составляющие: подъемная труба (ПТ) (выше смесителя) и подводящая труба (ниже смесителя). Воздухопровод также состоит из двух участков: нагнетающего пневмопровода 4, который соединяет компрессорную станцию со смесителем и дополнительного пневмопровода 5, соединяющего компрессорную станцию с выходом ПТ. Дополнительный пневмопровод оборудован управляемой задвижкой 6 и манометром 7. В верхней части подъемной трубы находится воздухоотделитель 8 и запорное устройство 9. К рассматриваемым элементам донного блока относятся: агрегат сбора (АС) 10, осуществляющий сбор твердых полезных ископаемых (ТПИ) со дна океана, отмыв ТПИ от донных осадков и предварительное дробление; бункер-накопитель (БН) 11, предназначенный для

Надбання наукових шкіл

промежуточного хранения запаса ТПИ; гибкая связь (ГС) 12, по которой ТПИ доставляется от АС к БН; шнек 13, обеспечивающий подачу твердого материала из БН в подводящую трубу; управляемая задвижка 14. За исходное состояние перед запуском принимается следующее: АС находится в состоянии готовности и выведен на исходную позицию; компрессор – выключен; приводы шнека и насоса ГС – выключены; задвижка 9 – закрыта.

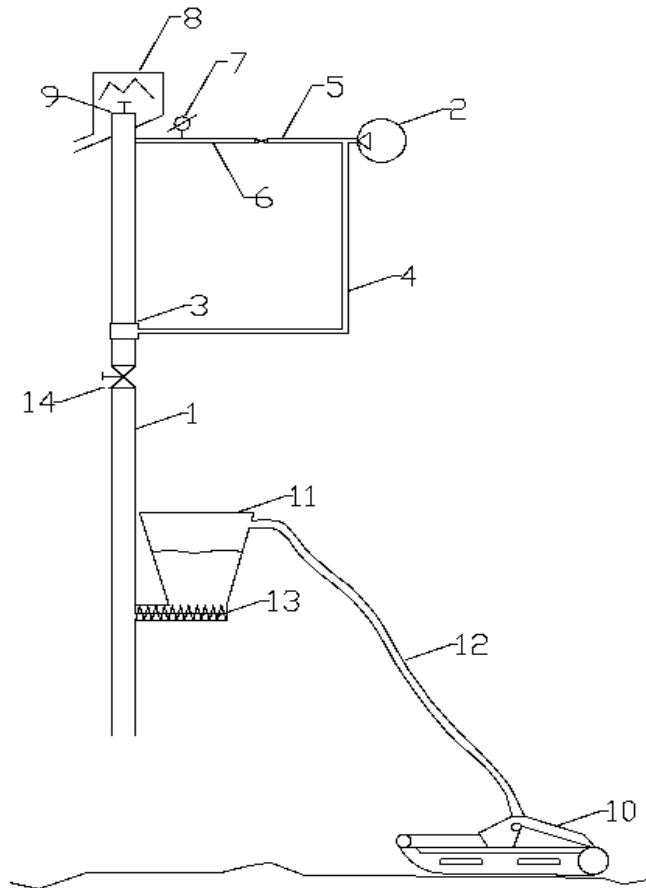


Рис. 1. Схема экспериментального ГЭГ

Принцип разработанного способа запуска заключается в предварительном снижении давления в смесителе путем выполнения следующих операций. При открытых задвижках 6 и 14 включается привод компрессора и осуществляется вытеснение воды из трубопроводов 1 и 4 через нижнее сечение ТТ. Перекрываются задвижки 6 и 14, и пневмопоток перенаправляется через нагнетающий пневмопровод 4 в смеситель 3. Открывается задвижка 14, что приводит к разгерметизации ТТ и снижению таким образом давления в смесителе с последующей подачей в него сжатого воздуха. Далее открывается задвижка 14 и эрлифт переходит в рабочий (установившийся) режим. На рис. 2 показан алгоритм останова описанного выше ГЭГ.

Первым действием алгоритма останова завершается работа АС (блок №1), при этом он либо начинает перемещение на стартовую позицию следующей заходки, либо остается на текущей позиции траектории сбора. Далее контролируется наступление события полной разгрузки ГС от твердого материала (блок №2) при помощи оптических либо радиационно-плотностных измерительных средств, после чего подается команда на выключение привода насоса ГС (блок №3). Затем системой контролируется процесс освобождения БН от ТПИ (блок №4), аналогичным образом, по окончании которого выключается привод шнека (блок №5). Следующим шагом проверяется необходимость выполнения подготовки к упрощенной процедуре запуска (ПУПЗ) ГЭГ (блок №6). Данная процедура может быть реализована если по окончании процесса останова ПТ будет не полностью заполнена морской водой, что даст

Надбання наукових шкіл

возможность осуществления последующего ускоренного (упрощенного) запуска ГЭГ на глубокорасположенном смесителе без предварительной процедуры вытеснения воды из ПТ [5]. Если необходимость в ПУПЗ отсутствует, то выполняются операции по контролю подъема последней порции ТПИ к смесителю (блок №12), а затем и к выходу из ПТ (блок №13), после чего выключается компрессор (блок №11). Если же потребность в ПУПЗ существует, то помимо процедур контроля подъема ТПИ к смесителю (блок №8) и к выходу из ПТ (блок №9) выполняются два дополнительных действия. Вывод компрессора на режим максимальной производительности (блок №7) необходим для того, чтобы после закрытия задвижки 14 (блок №10) уровень воды в ПТ максимально понизился после выключения компрессора (блок №11).

Из вышесказанного следует, что максимальное снижение уровня морской воды в ПТ после отключения компрессора соответствует минимальному времени закрытия задвижки 14. С другой стороны, быстрое срабатывание задвижки приводит к гидроудару.

Цель статьи состоит в проверке достоверности разработанной методики определения параметров гидроудара в однородной жидкости и установлении оптимального времени срабатывания запорно-регулирующей арматуры, минимизирующего негативные последствия гидроудара в предлагаемом способе запуска-останова ГЭГ.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма останова экспериментального ГЭГ

Для получения конкретных значений динамических параметров течения при заданных начальных и граничных условиях используются различные методы расчета.

Уравнения гидромеханики, описывающие одномерное нестационарное движение вязкой жидкости, являются квазилинейными уравнениями гиперболического типа, для которых предложено много способов решения.

Продолжением теоретических и экспериментальных работ первооткрывателя теории гидравлического удара Н.Е. Жуковского [6] стали использующие метод Даламбера исследования Мосткова [7]. Решение уравнений в частных производных по методу Даламбера сводится к ряду алгебраических операций над функциями, которые определяют характер возмущающих воздействий. Этот метод удобен для расчета коротких трубопроводов, в случае же сложных гидравлических систем возникает необходимость одновременного слежения за многочисленными отражениями волн, а это, в свою очередь, приводит к слишком громоздким соотношениям.

Графический метод расчета [8] обладает похожими недостатками.

Методы интегральных преобразований (метод контурных преобразований, операционный метод, преобразования Фурье) дают более широкие возможности для расчета параметров неустановившихся процессов [9], однако значительное количество задач, связанных с переходными процессами в напорных гидравлических системах, не поддается аналитическому решению.

Для исследования нестационарных режимов используются также аналоговые методы: моделирование передаточной функции, импедансный метод, метод электрической аналогии [10]. Основным недостатком аналоговых методов (не считая виртуального) является ограниченность класса решаемых задач, сложность перестройки моделей для новых условий.

Численные методы решения уравнений нестационарного движения жидкости (прямые разностные схемы, метод прогонки и метод характеристик) позволяют, в отличие от аналитических, получать решения без упрощения исходных уравнений (линеаризации), задаваясь при этом граничными условиями, которые присущи сложным гидравлическим системам [9, 11]. Численные расчеты, будучи реализованы в виде программы для ЭВМ, являются весьма гибким инструментом для решения задач нестационарного течения и при этом в рамках рассматриваемой математической модели (квазилинейных гиперболических уравнений) практически не накладывают ограничений на сложность как самих уравнений, так и краевых условий для них.

Для построения математической модели работы гидротранспортной системы в нестационарных режимах с учетом специфики эксплуатации ГЭГ, на наш взгляд, наиболее подходящим является численный метод характеристик. Это связано с тем, что данный метод позволяет достаточно точно описывать процессы в гидравлических системах со значительным количеством запорно-регулирующей арматуры различного типа, а также возможностью относительно простой реализации многовариантных расчетов по различным функциям цели.

Запишем дифференциальные уравнения движения реальной жидкости

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{(\lambda + \zeta_i)V|V|}{2gd} + g \sin \alpha = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где h – потенциальный напор; V – скорость жидкости, м/с; x – координата вдоль трубопровода, м; t – время, с; c – скорость распространения волны возмущения, м/с; λ – безразмерный коэффициент трения; ζ_i – безразмерный коэффициент местных сопротивлений; g – ускорение силы тяжести, м/с²; d – диаметр трубопровода круглого сечения, м; α – угол наклона.

Применение численного метода характеристик для решения поставленной задачи.

В работе [9] показано, что решение системы уравнений (1) эквивалентно интегрированию следующих обыкновенных дифференциальных уравнений вдоль соответствующих семейств характеристик:

$$\frac{g}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{(\lambda + \zeta_i)}{2} \frac{V|V|}{d} = 0; \quad (2)$$

вдоль семейства характеристик

$$dx = (V + c)dt; \quad (3)$$

$$-\frac{g}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{\lambda + \zeta_i}{2} \frac{V|V|}{d} = 0; \quad (4)$$

вдоль семейства характеристик

$$dx = (V - c)dt. \quad (5)$$

Для численного интегрирования системы (2-5) используется прямоугольная сетка в пространстве (x, t) , густота разбиения которой определяется шагом интегрирования по времени (рис. 3).

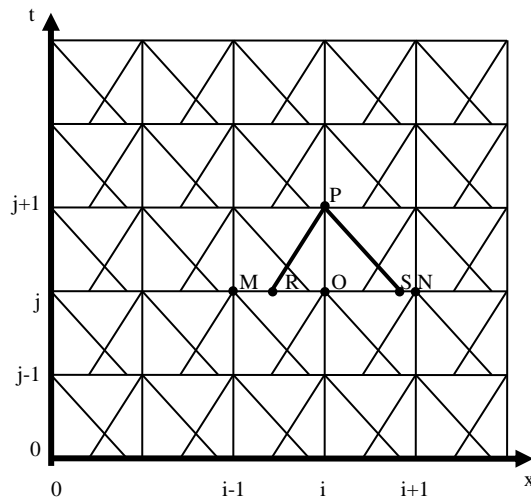


Рис. 3. Схема расчетной сетки

В результате представления дифференциальных уравнений (2-5) в конечных разностях, получим две системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} x_p - x_R = (V'_x + c)\Delta t, \\ \frac{g}{c}(h_p - h_R) + V_p - V_R + \frac{(\lambda_R + \zeta_R)V_R|V_R|\Delta t}{2d} = 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_p - x_S = (V''_x - c)\Delta t, \\ -\frac{g}{c}(h_p - h_S) + V_p - V_S + \frac{(\lambda_S + \zeta_S)V_S|V_S|\Delta t}{2d} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

совместное решение которых определяет x_R , x_S , h_p и V_p , т.е. параметры потока в точке P.

Значения V'_x и V''_x первоначально принимаются равными значению скорости в точке O, но поскольку положения точек R и S зависят от этих величин, то наклоны характеристик пересчитываются по скорректированным значениям $V'_x = (V_R + V_p)/2$ и $V''_x = (V_S + V_p)/2$ до тех

пор, пока два последовательно полученных значения V_x' и V_x'' достаточно мало будут отличаться друг от друга. Для решения системы уравнений (6-7) также необходимо задаться соответствующими начальными и граничными условиями.

Проверка адекватности предложенной математической модели движения жидкости и расчетного метода. Для расчетов по приведенной выше схеме была разработана программа, интерфейс которой позволяет задавать параметры трубопровода, начальные и граничные условия, закон изменения скорости потока в точке перекрытия трубопровода (время перекрытия задвижки) и получать результаты в графическом виде, а также в виде таблиц численных значений (рис. 4). Программа также позволяет работать с графическими результатами экспериментов, полученными другими авторами, оцифровывая их и сравнивая с полученными при тех же условиях расчетами.

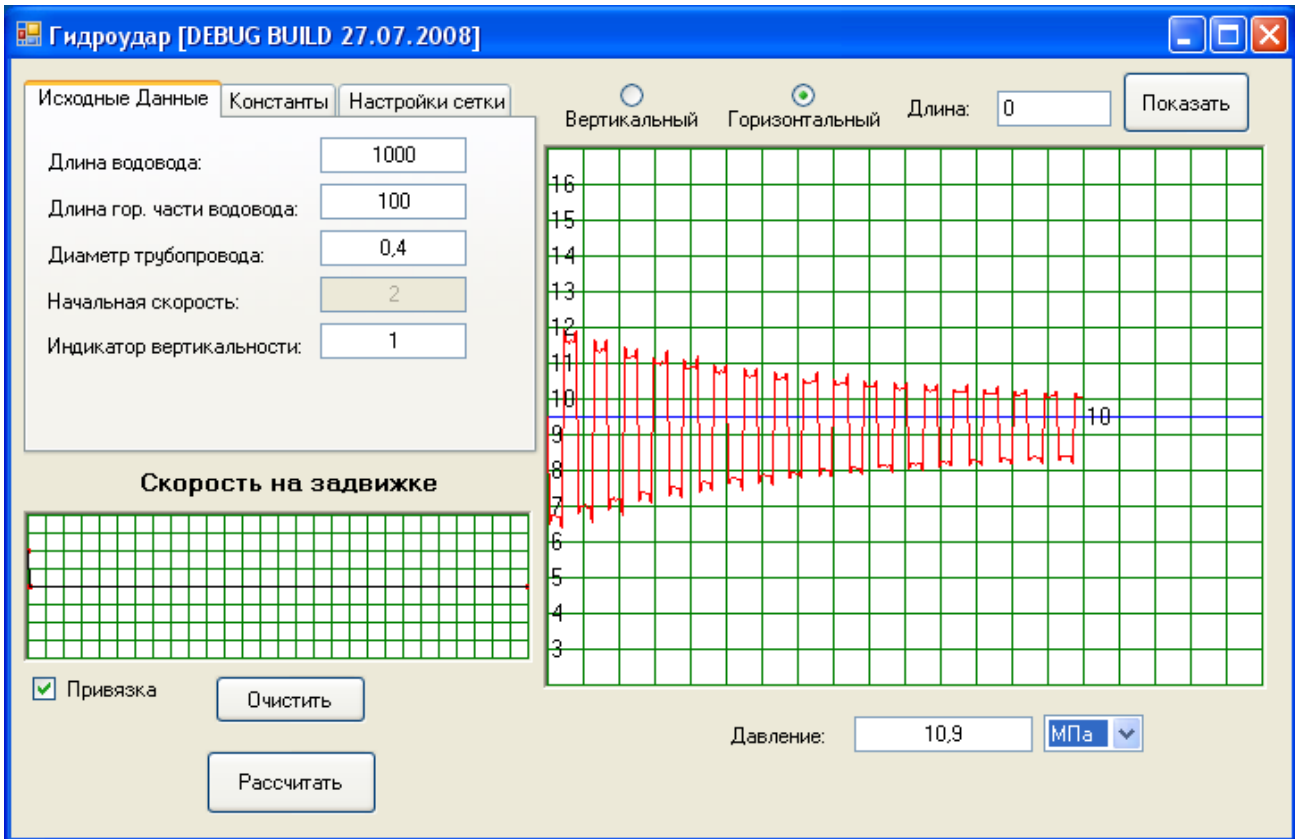


Рис. 4. Интерфейс разработанного программного обеспечения

Для подтверждения правильности функционирования разработанного программного обеспечения были проведены численные расчеты в условиях, совпадающих с условиями, проведенных другими авторами экспериментов [12]. Однако в ходе анализа имеющихся в открытой печати результатов экспериментов авторам не удалось найти экспериментальных работ, объектом исследования которых был бы гидроудар в системе вертикальных трубопроводов достаточно большой протяженности. Поэтому сравнение проводилось для горизонтальных трубопроводов. Кроме того, каждый из численных экспериментов дублировался авторами на электрической модели исследуемой системы, составленной при помощи программы Multisim по ранее разработанной методике электрического моделирования [10]. Основное отличие этой методики от существующих аналоговых электрических моделей состоит в том, что электрическая схема-аналог моделируемой гидравлической системы составляется виртуально при помощи специальной программы-симулятора. Методика позволяет в короткие сроки оценивать основные параметры гидродинамических процессов и наблюдать за их течением в реальном времени, однако, в силу ограниченности набора структурных элементов, не дает

возможности моделирования не прямых гидравлических ударов. На рис. 5 изображена картина гидравлического удара для горизонтальной системы трубопроводов, описанной в [12]. Длина трубопровода $L = 12,20$ м, скорость движения жидкости $v_{ж} = 0,4$ м/с, внутренний диаметр трубопровода $d_{ин} = 245$ мм, время закрытия задвижки τ_z мало по сравнению с фазой удара, что позволяет считать, что исследуемый гидроудар – прямой. Величина изменения давления фиксируется осциллографом, подсоединенным к датчику давления, который находится в непосредственной близости от задвижки.

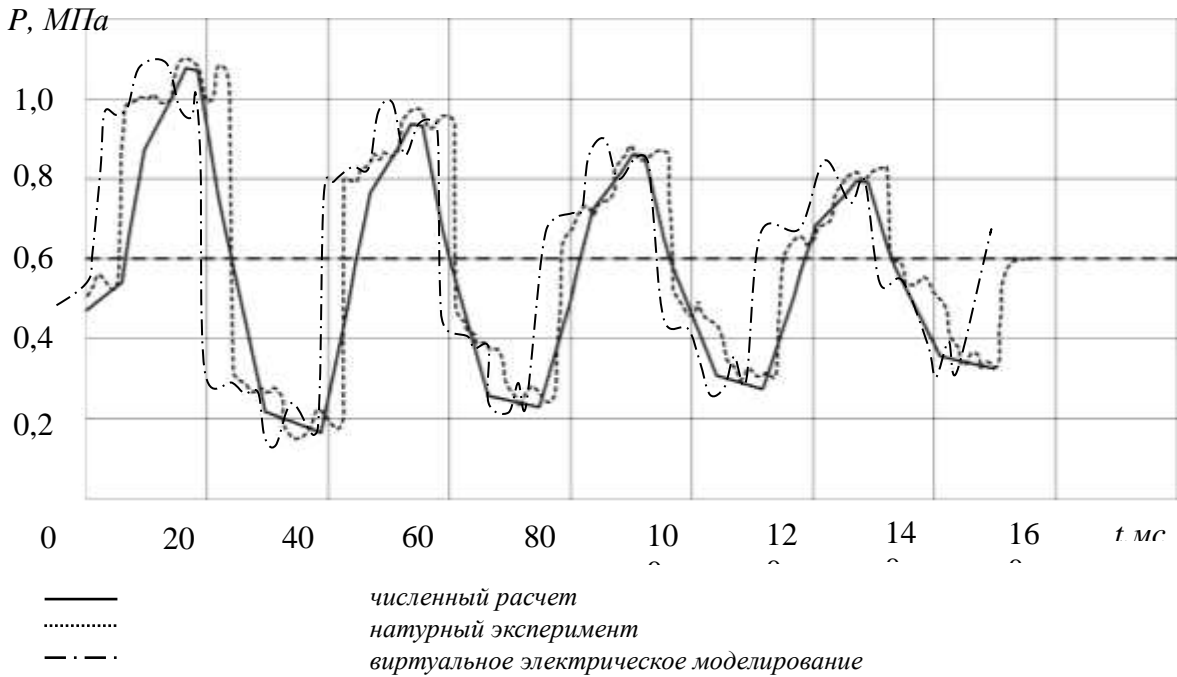


Рис. 5. Сравнение результатов численного расчета с экспериментальными данными ($L = 12,20$ м)

На рис. 6 показана аналогичная зависимость с той лишь разницей, что длина трубопровода $L = 9,14$ м.

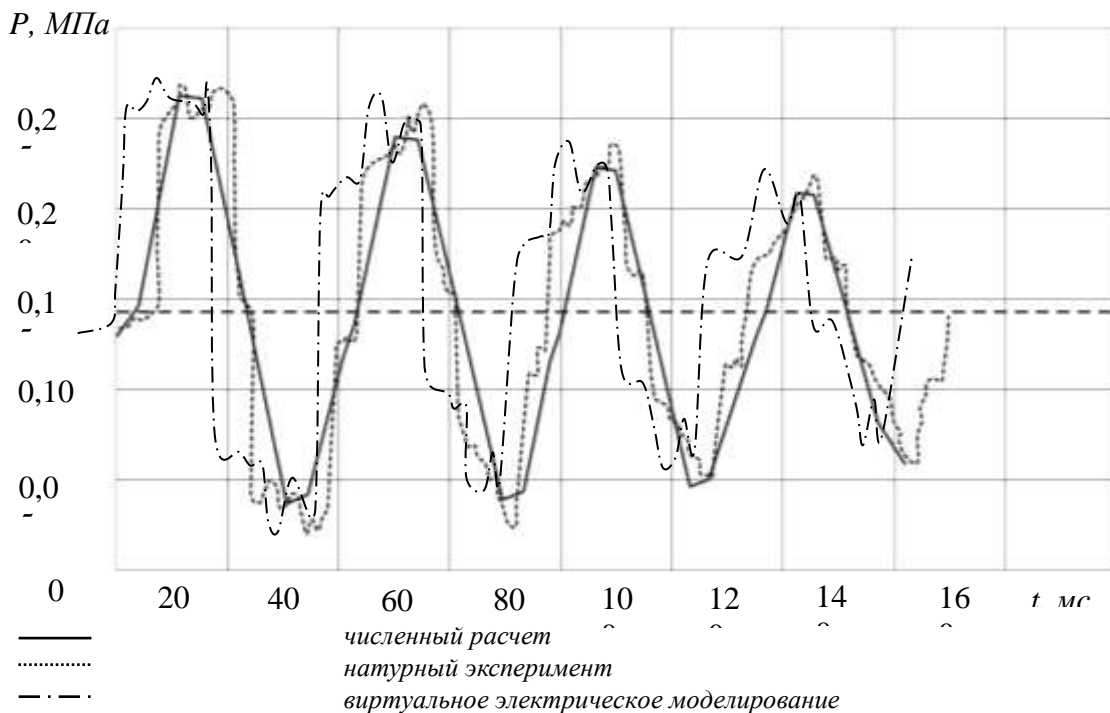


Рис. 6. Сравнение результатов численного расчета с экспериментальными данными ($L = 9,14$ м)

Как видно из рис. 5 и 6, пики давления расчетной кривой довольно точно совпадают по времени с экспериментальной. Форма колебаний расчетной кривой несколько иная, однако максимальное отклонение расчетных значений давления по методу характеристик от экспериментальных составило 14-16% (для первых четырех периодов). Аналогичное отношение результатов с использованием программы Multisim составило 18-20%. Следует отметить, что колебания в расчетной зависимости затухают несколько медленнее, нежели в экспериментальной, и это расхождение становится заметным начиная с 10-12 периода. Однако очевидно, что наибольшую опасность при гидроударе представляют собой именно первые несколько пиков давления, расчетная картина которых максимально близка к реальной. Стоит также отметить хорошее совпадение полученных численно значений первых (максимальных) бросков давления с результатами проверочных расчетов по формуле Жуковского [6]. Основываясь на вышесказанном, можно сделать вывод, что разработанная авторами вычислительная платформа с достаточной для технических расчетов степенью точностью отображает реальную картину гидравлического удара, что позволяет перейти к решению задачи оптимизации времени закрытия задвижки 14.

Оптимизация времени срабатывания задвижки. Объектом исследования является экспериментальный базовый ГЭГ для подъема 100000 т/год сухого сырья с глубины 6000 м, рациональные геометрические, расходные и энергетические параметры которого приведены в [14]. Следует отметить, что чем выше расположена задвижка 14, тем проще выполнить ее обслуживание, поэтому наиболее выгодно будет расположить задвижку 14 как можно ближе к смесителю ГЭГ. Поскольку смеситель исследуемой ГЭГ находится на отметке 2300 м [14], то задвижку 14 расположим несколько глубже.

Фаза гидравлического удара, возникающего в системе при перекрытии задвижки 14 будет равна $T = \frac{2l_3}{c} = 3,71$ с. Таким образом, самый опасный, прямой удар, будет происходить при перекрытии задвижки за время $\tau_3 < 3,71$ с.

На рис. 7-9 показаны зависимости давления от времени при мгновенном перекрытии задвижки ($\tau_3 = 0,01$ с), а также при $\tau_3 = 4$ с, что несколько больше фазы удара, и $\tau_3 = 30$ с, что является граничным временем, превышение которого связано с риском срыва ПУПЗ. Рис. 7-9 построены для скоростей движения 2, 3 и 4 м/с соответственно. Для достижения поставленной цели были выполнены систематические численные эксперименты (в широком диапазоне изменения исходных данных) при варьировании следующих величин: скорость движения жидкости и время срабатывания регулирующей задвижки, которые выборочно приведены на рис. 7-9.

Анализируя полученные результаты (рис. 7), можно утверждать, что максимальная амплитуда колебаний давления наблюдалась для случая прямого гидроудара (кривая 1 на рис. 7) и составила 2,363 МПа, что является весьма нежелательным в плане упомянутых выше причин. Наименьший прирост давления соответствует наибольшему времени закрытия задвижки $\tau_3 = 30$ с и составляет 0,85 МПа, что не представляет опасности. Наименьшим временем перекрытия задвижки, которое авторы рекомендовали бы брать за эталонное, является время, близкое к фазе гидроудара. При $\tau_3 = 4$ с удар уже не является прямым и первый, самый опасный пик давления несколько сглаживается, а бросок давления в 1,14 МПа не создает проблем в плане негативных последствий гидравлического удара. При таком перекрытии обеспечивается максимальная эффективность запуска-останова ГЭГ по изложенной выше методике, а риск повреждения системы минимален благодаря уходу от прямого гидроудара. Анализ результатов выполненных исследований с учетом требований, предъявляемых к параметрам переходных режимов в плане разработки алгоритмов управления [3], позволил сформулировать следующий **научный результат**: на базе разработанной методики определено оптимальное время срабатывания регулирующей задвижки в подводящей трубе ГЭГ, обеспечивающее высокую эффективность предлагаемого способа его останова и

гарантированное исключение негативных последствий гидроудара.

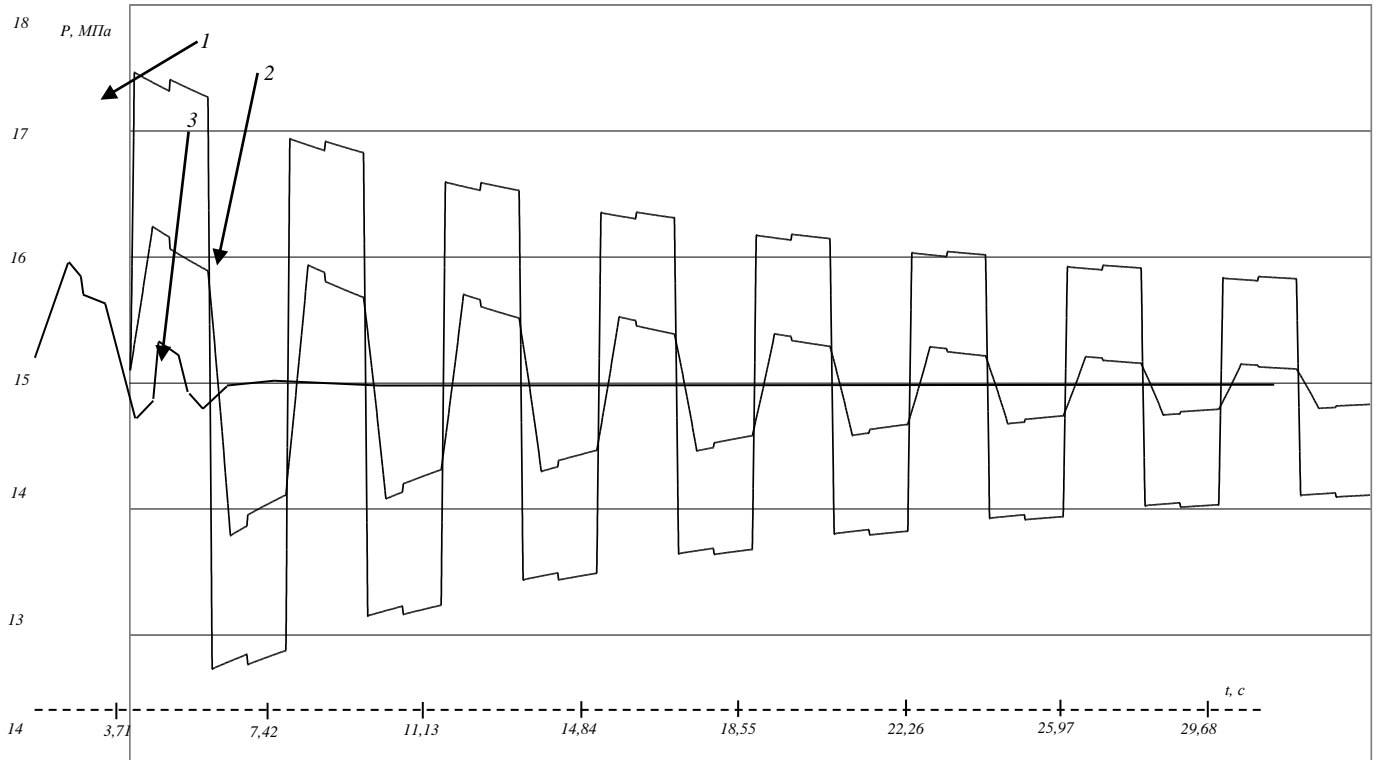


Рис. 7. Зависимости амплитуд колебаний давления от времени при скорости движения жидкости 2 м/с и разном времени перекрытия задвижки τ_s : 1 – $\tau_s = 0,01$ с; 2 – $\tau_s = 4$ с; 3 – $\tau_s = 30$ с

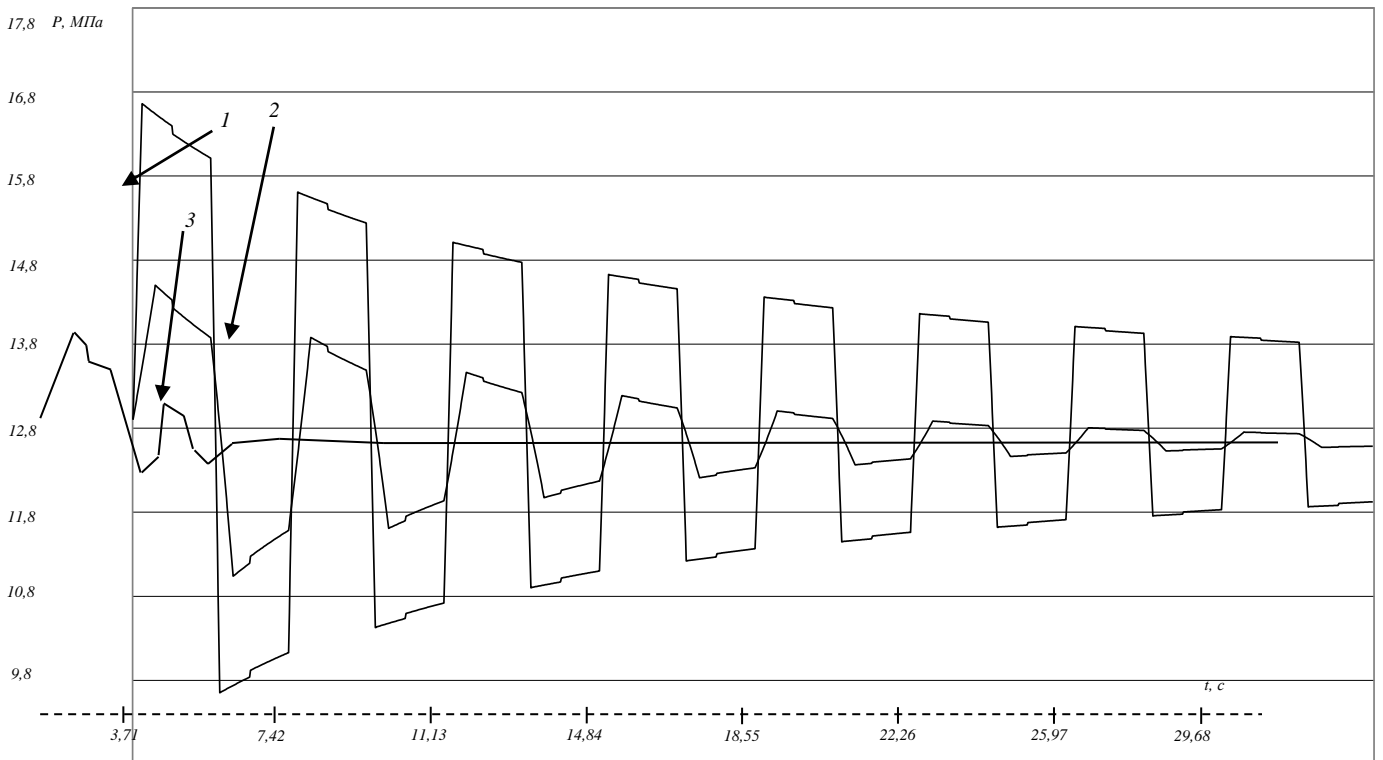


Рис. 8. Зависимости амплитуд колебаний давления от времени при скорости движения жидкости 3 м/с и разном времени перекрытия задвижки τ_s : 1 – $\tau_s = 0,01$ с; 2 – $\tau_s = 4$ с; 3 – $\tau_s = 30$ с

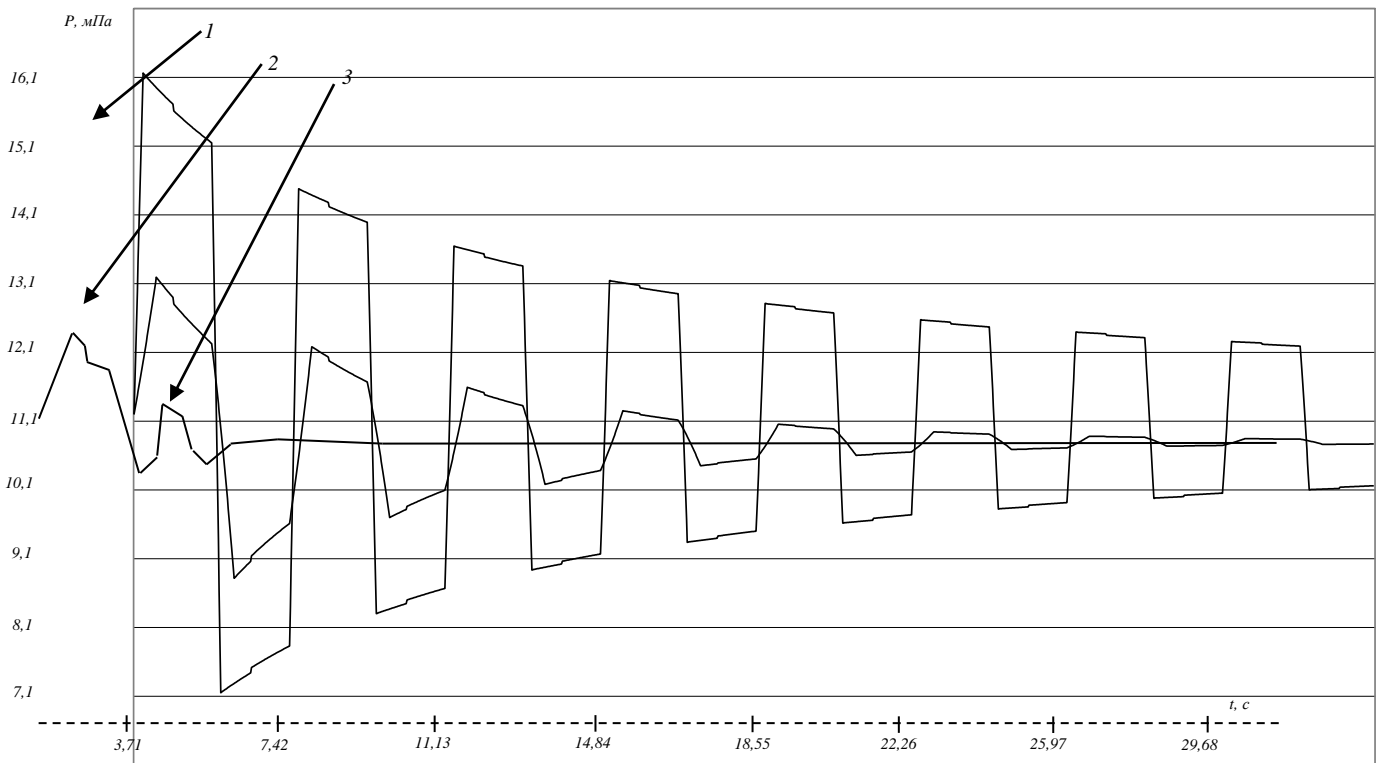


Рис. 9. Залежності амплитуд коливань тиску від часу при швидкості руху рідини 4 м/с і різних значеннях часу перекриття задвижки τ_z : 1 – $\tau_z = 0,01$ с; 2 – $\tau_z = 4$ с; 3 – $\tau_z = 30$ с

Дальнішим етапом досліджень є розробка методичного забезпечення моделювання нестационарних багатофазних течій в проточних частинах ГЗГ при аналізі експлуатаційних режимів установок.

Висновки. Розроблено методика і засоби її програмно-алгоритмічного забезпечення для визначення параметрів гідродару в однорідній рідині в розробленому способі зупинки ГЗГ, що враховують нелінійні ефекти і являються отправним пунктом для дослідження швидких нестационарних процесів в елементах гідропідйомів, транспортуючих багатокомпонентні гетерогенні суміші.

Розроблено рекомендації по визначенню оптимальних параметрів швидкодіяння запорно-регулюючої арматури, що забезпечують ефективний запуск-зупинку ГЗГ в запропонованому способі роботи гідропідйому при оптимальному зануренні змішувача і мінімізують негативні наслідки гідродару.

Список літератури

1. Кириченко Е.А. Численне моделювання перехідних процесів в глибоководному ерліфті // Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 1998. – Вип. 1. – С. 116-124.
2. Скорьнін Н.І. Дослідження і розробка глибоководних багосмесительних ерліфтичних установок для підйому гірських мас: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Донецьк, 1984. – 19 с.
3. Кириченко Е.А., Самуся В.І., Кириченко В.Е. Особливості розробки експериментальної автоматизованої системи управління морськими гірськими добувними комплексами // Зб. наук. праць / НГУ – 2008. – Вип. 30. – С. 112-120.
4. Блочний-ієрархічний підхід до розробки технології управління глибоководними добувними комплексами / Кириченко Е.А., Самуся В.І., Кириченко В.Е. // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 1(80). – С. 101-109.

5. Пат. 84333 України, E21B43/00, F04F1/20. Спосіб запуску і зупинки морського ерліфта та система для його здійснення / Півняк Г.Г., Кириченко Є.О., Євтєєв В.В., Шворак В.Г., Кириченко В.Є. – Опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.
6. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949.
7. Мостков М.А., Башкиров А.А. Расчеты гидравлического удара. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с.
8. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. – М.: Машгиз, 1962. – 206 с.
9. Картвелишвили Н.А. Динамика напорных трубопроводов. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
10. Кириченко Е.А., Трояновская Ю.М., Романюков А.В. К вопросу о перспективах метода электрического моделирования нестационарных процессов в шахтных трубопроводах // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 1. – С. 54-60.
11. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 198 с.
12. Контрактор Д.Н. Отражение волн давления при гидравлическом ударе от местных сопротивлений // ASME – 1967. – ser. D. – № 2. – С. 212-220.
13. Исследование параметров гидроудара в рамках виртуальной электрической модели / Кириченко Е.А., Гоман О.Г., Корсун Ф.А., Романюков А.В. // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 6. – С. 67-74
14. Кириченко Е.А. Выбор и обоснование рациональных параметров глубоководной эрлифтной установки с учетом влияния питающей пневмосистемы: Дис... канд. техн. наук: 05.05.06. – Д., 1989. – 172 с.