

УДК 622.411.5:539.215

В.И. Самуся, В.В. Евтеев, В.Е. Кириченко

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПОТОКА
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭРЛИФТНОМУ ТЕЧЕНИЮ**

Розроблено комплексний експериментальний гідравлічний стенд, що дозволяє здійснювати фізичне моделювання одно-, дво- і трикомпонентних потоків в проточних частинах насосної, ерліфтної і насосно-ерліфтної установок. Досліджено кінематичні параметри вертикального водоповітряного потоку при снарядній структурі течії.

Разработан комплексный экспериментальный гидравлический стенд, позволяющий осуществлять физическое моделирование одно-, двух- и трехкомпонентных потоков в проточных частях насосной, эрлифтной и насосно-эрлифтной установок. Исследованы кинематические параметры вертикального водовоздушного потока при снарядной структуре течения.

The complex experimental hydraulic table simulator is elaborated. It makes it possible to carry out physical simulation of one-, two- and three-component flows in the flow channels of pumping, airlift and pump-airlift units. The kinematic data of vertical air-water flow with the shell flow structure are researched.

Актуальность вопроса. Интенсификация объемов добычи полезных ископаемых традиционными технологиями на протяжении XX века привела к резкому сокращению объемов, сосредоточенных в условиях континентов месторождений. Всемирный экономический кризис в начале XXI века более четко вырисовывает современную тенденцию развития промышленности, предусматривающую необходимость освоения и производства высокотехнологической продукции. Эта продукция в условиях современного рынка продолжает пользоваться спросом и в процессе своего производства требует использования широкого спектра разнообразных компонентов сырьевой базы.

Расширение существующих государственных стратегических сырьевых баз служит залогом стабильного развития национальных экономик в третьем тысячелетии, что уже проявляется в возрастании интереса к минеральным ресурсам Мирового океана. Ряд правительственных постановлений относят расширение сырьевой базы Украины к одной из важнейших задач отечественной экономики. Решение Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16 мая 2008 г. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави», введенным в действие указом Президента Украины № 463/2008 от 20 мая 2008 года, предусматривает разработку новой «Національної програми досліджень і використання ресурсів Азово-Чорноморського басейну, інших районів Світового океану на 2009-2034 роки». Сосредоточенные в глубинах Мирового океана значительные по объему залежи сульфидов, кобальто-марганцевых корок и полиметаллических конкреций также представляют коммерческий интерес в плане промышленного производства никеля, вольфрама, кобальта, меди и др. цветных металлов. В настоящее время выполнены геологические исследования крупных глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых.

При разработке подводных месторождений на больших глубинах наиболее энергоемким процессом является транспортирование добытой горной массы до надводной части горно-морского предприятия. Исходя из современного уровня техники, наиболее приемлемым для технической реализации является применение морских добычных комплексов, функционирующих на базе гидравлической системы подъема. Эрлифтные гидроподъемы обладают высокой надежностью в эксплуатации за счет простоты конструкции и расположения основного технологического оборудования на поверхности водоема, что значительно упрощает проведение его технического обслуживания. Это позволяет на сегодняшний день считать эрлифтные установки наиболее перспективным средством транспортирования сырья сквозь толщу воды, несмотря на их высокую энергоемкость. Глубоководные гидроподъемы имеют аналоги в разных сферах промышленности, поэтому полученные результаты представляют интерес и для шахтных эрлифтных установок. Таким образом, определение рациональных параметров установок на стадии проектирования позволит повысить эффективность гидроподъема. Данная статья посвящена **актуальной проблеме** – определению рациональных параметров эрлифтных гидроподъемов, обеспечивающих эффективную эксплуатацию установок с наиболее высокими технико-экономическими показателями.

Существует большое количество методов расчета эрлифтов, эксплуатируемых в различных сферах народного хозяйства. К таковым следует отнести основанные на использовании безразмерных расходных характеристик эмпирические методы [1, 2], а также методы, содержащие различной сложности уравнения гидродинамики гетерогенных смесей [3-8]. Перечисленные методы либо вообще не учитывают наличие одновременно существующих различных структур течения (пузырьковой, снарядной, кольцевой, дисперсной) в подъемной трубе, либо рассматривают их в рамках непрерывных двухфазных моделей без учета динамики твердых частиц, что существенно влияет на расходные и энергетические параметры установок [9]. Известны работы, в которых применительно к эрлифтному гидроподъему рассматривается кинематика вертикального движения твердых частиц, транспортируемых водовоздушным потоком, без учета расширения воздуха, изменения скорости смеси и других существенных факторов [10-11]. В наиболее полной

постановке для исследования параметров снарядной структуры течения (ССТ) с учетом динамики твердых частиц разработан численно-аналитический метод расчета глубоководных эрлифтов [12]. Таким образом, известные методы [3-12] рассматривают снарядную структуру течения с разной степенью приближений и обладают одним общим недостатком – отсутствием экспериментальных подтверждений достоверности теоретических моделей. При этом транспортирование твердых частиц водовоздушной смесью при снарядной структуре течения во многом определяется кинематикой самого двухфазного потока ввиду морфологических особенностей течения [9].

Цель работы – экспериментальное исследование кинематических характеристик вертикального потока водовоздушной смеси при снарядной структуре течения.

Экспериментальные исследования проводили в условиях лаборатории гидравлики и гидропривода кафедры горной механики НГУ на базе комплексного экспериментального гидравлического стенда (см. рис. 1, 2), позволяющего осуществлять физическое моделирование одно-, двух- и трехкомпонентных потоков в проточных частях насосной, эрлифтной и насосно-эрлифтной установок. Причем конструкция гидравлического стенда предусматривает варьирование величиной относительного динамического погружения смесителя подъемной трубы в диапазоне 0,4-0,95, что позволяет моделировать процессы как коротких шахтных установок, так и глубоководных установок значительной протяженности. В гидравлическом стенде предусмотрено применение задвижек 37-40, 42-47 и 49-53 шарового типа, а источник лазерного излучения 21 и фоторезистор 22 закреплены в верхней части на диаметрально противоположных сторонах трубопровода 19.

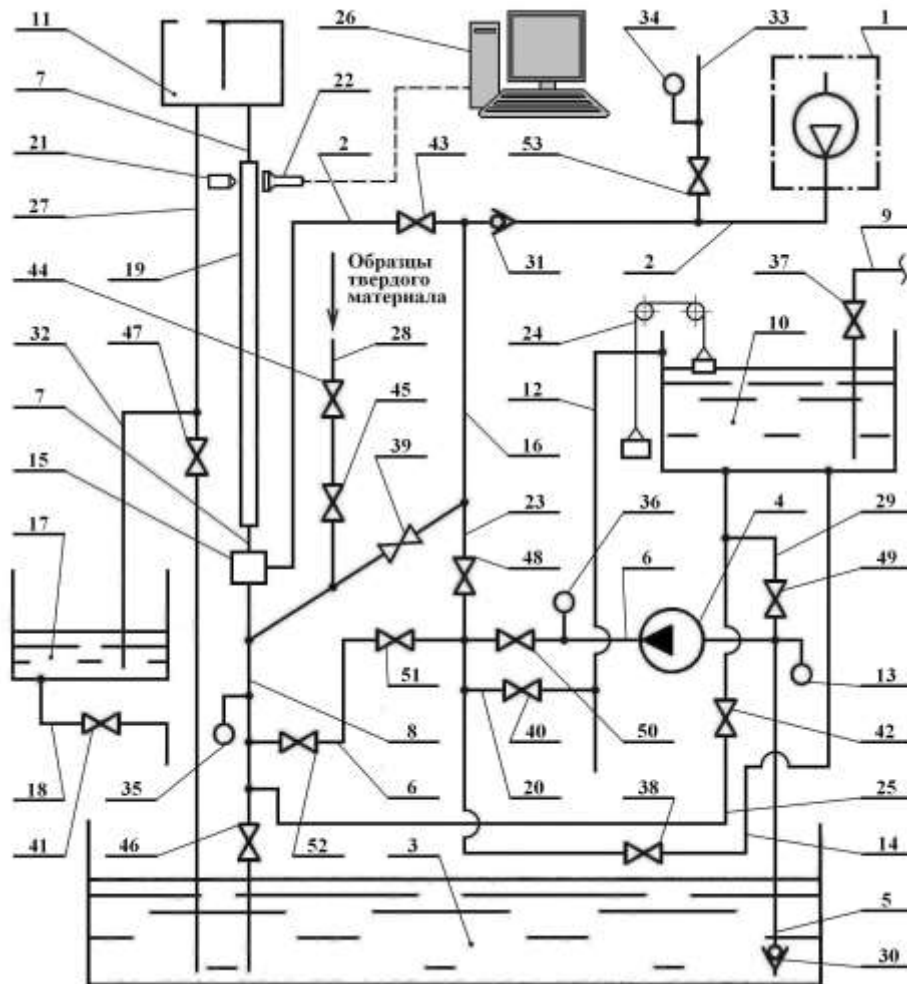


Рис. 1. Комплексный экспериментальный гидравлический стенд: 1 – компрессорная установка; 2 – нагнетательный трубопровод компрессорной установки; 3 – бассейн; 4 –

одноступенчатый центробежный насос; 5, 6 – всасывающий и нагнетательный трубопроводы насоса; 7, 8 – подъемная и подводная трубы; 9 – водопровод; 10 – резервуар; 11 – воздухоотделитель; 12 – трубопровод; 13 – датчик измерения вакуумметрического давления; 14 – компенсационный трубопровод; 15 – смеситель; 16 – дополнительный трубопровод; 17 – измерительный резервуар; 18 – сливной патрубок; 19 – трубопровод, выполненный из прозрачного пластика; 20 – патрубок; 21 – источник лазерного излучения; 22 – фоторезистор; 23 – обводной патрубок; 24 – датчик определения уровня жидкости поплавкового типа; 25 – обводной трубопровод; 26 – ЭВМ (AMD Athlon); 27 – сливной трубопровод; 28, 29 – дополнительный и вспомогательный патрубки; 30, 31 – обратные клапаны; 32 – отдельный трубопровод; 33 – отдельный патрубок; 34 – счетчик расхода газа; 35, 36 – манометры; 37-53 – задвижки

Проведение эксперимента осуществлялось следующим образом.

Перед запуском комплексного экспериментального гидравлического стенда при моделировании потока водовоздушной смеси, получаемого в результате работы эрлифтной установки, все задвижки 37-53 были полностью закрыты.

При подготовке стенда к запуску открывали задвижку 37 и подавали воду из водопровода 9 в резервуар 10. После достижения уровнем воды верхнего контролируемого уровня, что характеризовалось вытеканием воды из резервуара 10 по трубопроводу 12 в бассейн 3, задвижку 37 закрывали. Заполняли внутренний объем рабочей ступени насоса 4 водой путем открытия задвижек 49, 50 и 40. Сосредоточенная в резервуаре 10 вода поступала через обводной трубопровод 25, вспомогательный патрубок 29 и всасывающий трубопровод 5 в насос 4. При вытекании воды из трубопровода 12 в бассейн 3, что свидетельствовало о заполнении насоса 4 водой, закрывали задвижки 49, 40 и 50.

Запуск стенда начинался с открытия задвижки 42. В результате воздействия статического давления вода из резервуара 10 через обводной трубопровод 25, подводную трубу 8 и смеситель 15 начинала поступать в подъемную трубу 7. После достижения равенства уровней воды в резервуаре 10 и подъемной трубе 7, что характеризовалось прекращением движения воды в пластиковом трубопроводе 19, запускали поршневой компрессор 54 и открывали задвижки 43 и 53. Создаваемый компрессором 54 поток сжатого воздуха, двигаясь по нагнетательному трубопроводу 2, через ресивер 56, маслолагоотделитель 57 и отдельный патрубок 33, сбрасывался в атмосферу. Обеспечение подачи сжатого воздуха по нагнетательному трубопроводу 2 в смеситель 15 осуществлялось путем постепенного закрытия задвижки 53.

Таким образом, в подъемной трубе 7 образовывался поток водовоздушной смеси, который двигался в воздухоотделитель 11. Выводимый в воздухоотделителе 11 из состава водовоздушной смеси воздух поступал в атмосферу, а образуемая при этом вода по сливному трубопроводу 27 отводилась в бассейн 3. При поступлении воды из воздухоотделителя 11 по сливному 27 и отдельному 32 трубопроводам в измерительный резервуар 17 запускали залитый водой насос 4 с последующим открытием задвижек 41, 47, 50 и 38. Насос 4 начинал перекачивать воду из бассейна 3 по всасывающему 5, нагнетательному 6 и компенсационному 14 трубопроводам в резервуар 10. Стабильность уровня воды в резервуаре 10 достигалась при наличии вытекания из него воды по трубопроводу 12 в бассейн 3 путем регулирования величиной открытия задвижки 38.

Подачу воздуха в смеситель 15 регулировали открытием задвижки 53.

Расход воздуха, сбрасываемого из нагнетательного трубопровода 2 в атмосферу вследствие открытия задвижки 53, определяли путем измерения объема воздуха, проходящего через отдельный патрубок 33, за измеряемый секундомером период времени. Объем проходящего через отдельный патрубок 33 воздуха при атмосферном давлении определял счетчик расхода газа 34. Расход выводимого из нагнетательного трубопровода 2 в атмосферу воздуха при конкретной величине открытия задвижки 53 и атмосферном

давлении определяли как среднее арифметическое значение семи соответствующих измерений.

Расход входящего в состав потока водовоздушной смеси воздуха при атмосферном давлении и фиксированной величине открытия задвижки 53 определяли как разность значений между величинами реальной рабочей производительности компрессора 54 и расхода выводимого из нагнетательного трубопровода 2 в атмосферу воздуха. Реальную рабочую производительность компрессора 54 при атмосферном давлении определяли путем измерения объема воздуха, проходящего через отдельный патрубок 33, за измеряемый секундомером период времени при полностью открытой 53 и полностью закрытых 39, 43, 48 задвижках.

Расход воды в подъемной трубе 7 определяли при помощи измерительного резервуара 17 путем полного закрытия задвижки 47 и определения поступившего в него объема воды за измеряемый секундомером период времени. При фиксированной величине открытия задвижки 53 производили несколько замеров расхода воды в сливном трубопроводе 27, который соответствовал расходу воды в потоке, поступающем в смеситель 15 из подводящей трубы 8. Расход входящей в состав потока водовоздушной смеси воды при конкретной величине открытия задвижки 53, т.е. для определенной подачи в смеситель 15 сжатого воздуха, определяли как среднее арифметическое значение семи соответствующих измерений.

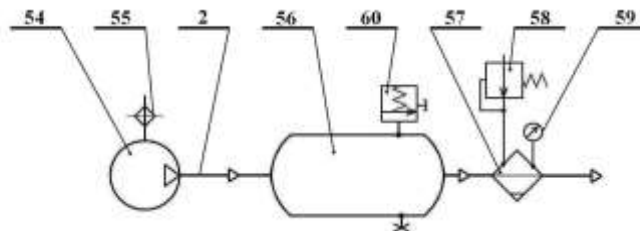


Рис. 2. Схема компрессорной установки: 54 – компрессор поршневого типа; 55 – воздушный фильтр; 56 – ресивер; 57 – масляный отделитель; 58 – регулятор давления; 59 – манометр и 60 – предохранительный клапан

Для выполнения многократных замеров расхода воды накопленную от предыдущих измерений воду сливали из измерительного резервуара 17 через сливной патрубок 18 в бассейн 3 путем открытия задвижки 41.

Манометр 35 измерял величину давления потока воды у входа в смеситель 15, а манометр 59 – величину давления воздуха в нагнетательном трубопроводе 2.

После запуска насоса 4 включали источник лазерного излучения 21 и подсоединенную к фоторезистору 22 ЭВМ.

Увеличение объема воздуха во внутреннем поперечном сечении трубопровода 19, через которое проходил образуемый источником лазерного излучения 21 луч, приводило к получению большего фототока в фоторезисторе 22 и наоборот. Определение структуры вертикального течения водовоздушной смеси в подъемной трубе 7, благодаря наличию выполненного из прозрачного пластика трубопровода 19, осуществлялось как визуально, так и при помощи ЭВМ (рис. 3, 4). Закрепление источника лазерного излучения 21 и фоторезистора 22 в верхней части трубопровода 19 на расстоянии 2,5 м от смесителя 15 позволило максимально снизить влияние возникающей в смесителе 15 турбулентности на экспериментальные характеристики водовоздушного потока.

Как видно из приведенного на рис. 3 фрагмента записи оптических сигналов, кривая имеет случайный характер и не позволяет проследить за движением какой-нибудь определенной неоднородности в потоке. Она отражает пузырьковый режим.

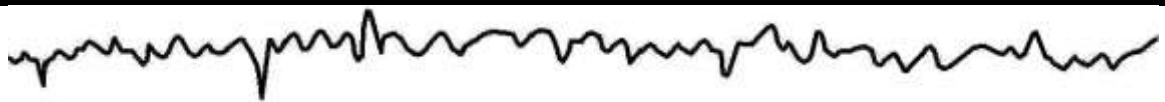


Рис. 3. Фрагмент записи оптичних сигналів при бульб'язовій структурі течення водовоздушної суміші

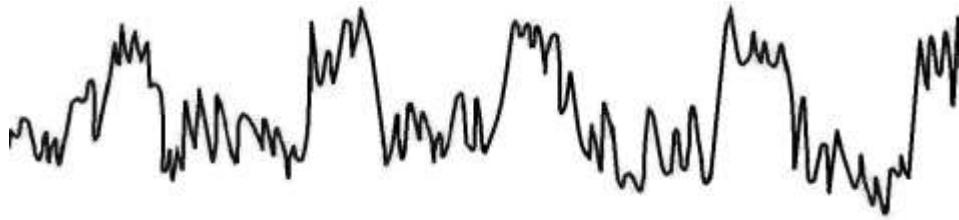


Рис. 4. Фрагмент записи оптичних сигналів при снарядній структурі течення водовоздушної суміші

Снарядна структура течення в трубопроводі 19 діаметром 0,058 м виникала при об'ємному газосодержанні 0,365-0,731 дол. ед. Показана на рис. 4 крива демонструє ярко виражені імпульси, що відповідають піднімаючомуся снаряду або жидкотною пробкою. ЕВМ 26 в масштабі реального часу з використанням отриманої від фоторезистора 22 інформації виробляла визначення довжин жидкостних пробок і газових снарядів, а також визначала кількість зв'язок або циклів (газових снарядів і наступних за ними відповідних жидкостних пробок) в одиницю часу. Експериментальні і розрахункові результати дослідження снарядної структури течення, що виникає при роботі ерліфтною установки, виборочно наведені на рис. 5-8. Розрахунки були виконані в відповідності з численно-аналітичним методом [12]. При цьому на всіх нижчеприведених рисунках сплошні лінії відображають результати експерименту, пунктирні – результати відповідних розрахунків, а графіки 6, б-8 характеризують процеси в досліджуваному поперечному сеченні трубопроводу 19 – на рівні закріплення джерела лазерного випромінювання 21. На рис. 5, а, б представлені залежності зміни об'ємного витрату води ($Q_{ж}$) від об'ємного витрату повітря при нормальних умовах (Q_2). Зображені на рис. 5, а криві відповідають відносному динамічному зануренню сумішника підіймальної труби 0,95, на рис. 5, б – 0,4. Різниця δ між розрахунковими і експериментальними результатами збільшується прямо пропорційно об'ємному витрату повітря, а максимальна похибка результатів розрахунку не перевищує 17%. Приведені нижче на рис. 6-8 графіки відповідають зображеним на рис. 5, а продуктивностям ерліфта.

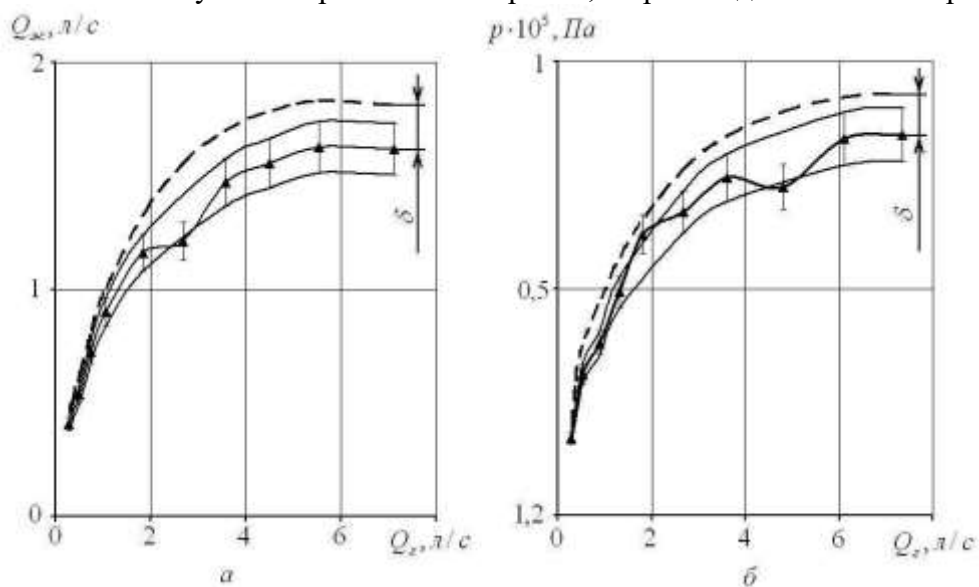


Рис. 5. Залежності змін об'ємного витрату води $Q_{ж}$ від об'ємного витрату повітря при нормальних умовах Q_2

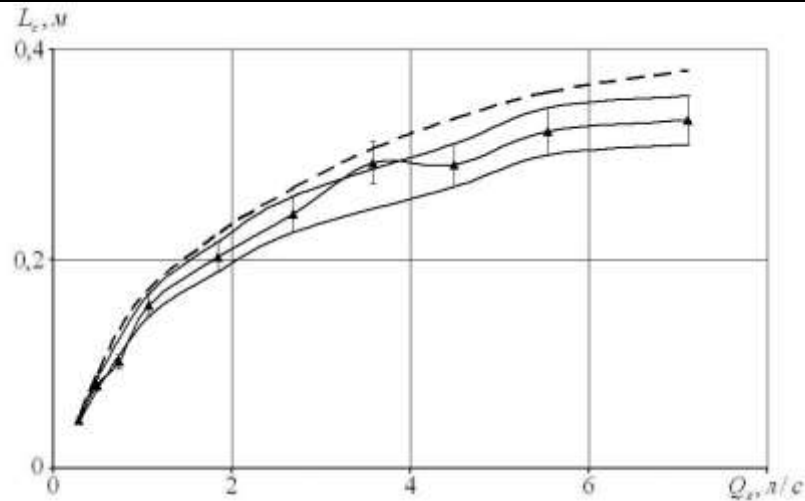


Рис. 6. Зависимости изменений длин воздушных снарядов L_c от объемного расхода воздуха при нормальных условиях Q_2

Рис. 6 демонстрирует зависимости изменения длин воздушных снарядов (L_c) от объемного расхода свободного воздуха (Q_2). Графики показывают, что с увеличением расхода воздуха приращение длин воздушных снарядов в исследуемом поперечном сечении подъемной трубы уменьшается, причем увеличение длины воздушных снарядов происходит наиболее интенсивно в начале снарядной структуры течения (до 35-37 % от максимальной длины воздушного снаряда). Это объясняется тем, что с увеличением длин воздушных снарядов на процесс их дальнейшего расширения возрастает влияние стесняющего действия стенок трубопровода 19.

Рис. 7 отображает зависимости изменения длин циклов (L_u) – кривые 1.1, 1.2 и жидкостных пробок (L_n) – кривые 2.1, 2.2 от объемного расхода воздуха при нормальных условиях (Q_2). Из графиков видно, что увеличение расхода воздуха приводит к увеличению длин циклов и уменьшению длин жидкостных пробок. Выполненные расчеты не учитывают всего объема воздуха, попадающего в объем жидкостной пробки в начале формирования снарядной структуры течения, о чем свидетельствует превышение экспериментальных данных длин жидкостных пробок соответствующих расчетных результатов при минимальных длинах циклов. С увеличением расхода воздуха расстояние от смесителя 15 до зоны формирования снарядной структуры течения уменьшается, а расстояние от зоны формирования снарядной структуры течения до исследуемого поперечного сечения трубопровода 19 увеличивается. Формируемые в начале снарядной структуры воздушные снаряды содержат капли воды, а жидкостные пробки – воздушные включения. Заключение в жидкостных пробках воздух всплывает и поступает в нижние части движущихся перед пробками воздушных снарядов, вследствие чего длины жидкостных пробок уменьшаются, а разность между расчетными и экспериментальными их длинами сокращается. При этом выведение жидкостных включений из воздушных снарядов осуществляется быстрее, чем воздуха из жидкостных пробок. Скорость движения сжатого воздуха в смеси превышает скорость транспортирования жидкостного компонента. Сосредоточенная в нижней части жидкостной пробки вода протекает между поднимающимся за ней воздушным снарядом и стенками трубопровода 19 в верхнюю часть следующей за воздушным снарядом жидкостной пробки. С точки зрения физики данного процесса, его механизм, по мнению авторов, можно охарактеризовать как работу «неплотного поршня». Увеличение длин циклов происходит за счет увеличения объема снарядов сжатого воздуха, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления обтеканию воздушных снарядов сосредоточенной в жидкостных пробках водой. Таким образом, с увеличением длин циклов замедляется отток воды из жидкостных пробок, а, следовательно, и процесс уменьшения их длин.

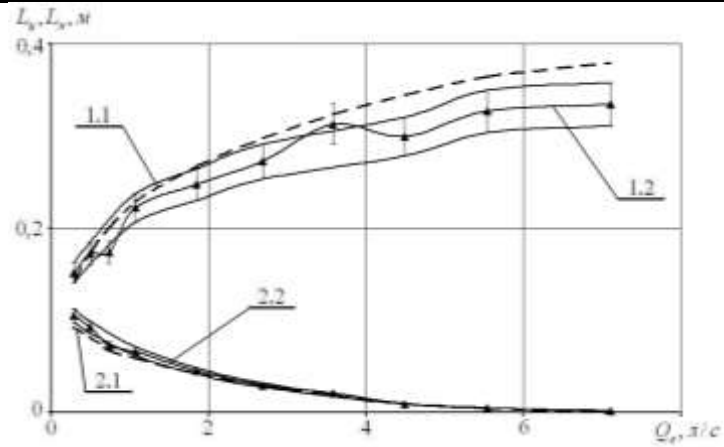


Рис. 7. Зависимость изменений длин циклов L_c и жидкостных пробок L_n от объемного расхода воздуха при нормальных условиях Q_e

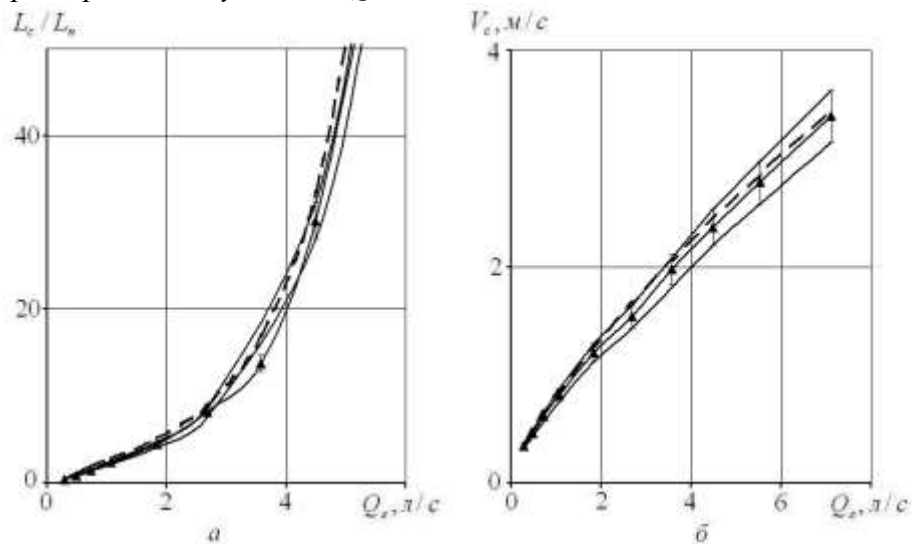


Рис. 8. Зависимости изменений отношения длин воздушных снарядов L_c к длинам жидкостных пробок L_n (а) и скорости движения снарядов V_c (б) от объемного расхода воздуха при нормальных условиях Q_e

Характер кривых также показывает, что обтекание водой коротких воздушных снарядов происходит более интенсивно, чем длинных.

На рис. 8, а представлены зависимости изменения величины отношения длины воздушных снарядов к длине соответствующих им жидкостных пробок (L_c/L_n) от объемного расхода воздуха при нормальных условиях (Q_e). Как видно, до восьмикратного превышения длиной воздушного снаряда длины жидкостной пробки зависимость имеет характер, близкий к линейному. Рис. 8, б демонстрирует зависимости изменения скорости движения снарядов сжатого воздуха (V_c) на уровне установки источника лазерного излучения 21 от объемного расхода воздуха при нормальных условиях (Q_e). Скорость движения воздушных снарядов изменяется прямо пропорционально расходу воздуха, а характер ее изменения близкий к линейному.

На основании комплексного анализа вышеприведенных зависимостей с учетом взаимного влияния определяющих параметров на характеристики системы в работе получен новый **научный результат**, выражающийся в установлении следующих закономерностей изменения параметров потока водовоздушной смеси при снарядной структуре течения:

– разность скоростей, входящих в состав водовоздушной смеси газообразного и жидкостного компонентов в подъемной трубе эрлифта, обратно пропорциональна длине

воздушных снарядов за счет более интенсивного обтекания водой коротких воздушных снарядов, чем длинных.

– зависимость изменения величины отношения длин воздушных снарядов к длинам, соответствующим им жидкостным пробкам до восьмикратного превышения длиной воздушного снаряда длины жидкостной пробки, имеет характер, близкий к линейному.

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

– проверена адекватность математического аппарата расчета параметров снарядной структуры водовоздушной смеси экспериментальным данным, при этом максимальная погрешность результатов расчета не превышает 17%;

– изучен механизм движения снарядов сжатого воздуха и жидкостных пробок в снарядной структуре течения водовоздушной смеси, заключающийся в том, что увеличение длин воздушных снарядов приводит к замедлению оттока воды из жидкостных пробок, а, следовательно, и уменьшению их длин, вследствие увеличения гидравлического сопротивления обтеканию воздушных снарядов сосредоточенной в жидкостных пробках водой;

– для исследуемого диапазона изменения кинематических характеристик вертикального двухкомпонентного снарядного потока впервые предложена теория «неплотного поршня», отображающая простую физическую трактовку исследуемого процесса;

– с увеличением расхода воздуха приращение длин воздушных снарядов в фиксированном поперечном сечении подъемной трубы уменьшается, причем увеличение длины воздушных снарядов происходит наиболее интенсивно в начале снарядной структуры течения (до 35-37% от максимальной длины воздушного снаряда) за счет возрастания влияния стесняющего действия стенок трубопровода.

Дальнейшим этапом исследований является экспериментальное исследование параметров снарядной структуры течения водовоздушной смеси с учетом динамики твердых частиц.

Список литературы

1. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дис. ... канд. техн. наук. – Донецк: ДПИ, 1982. – 323 с.
2. Скорынин Н.И. Исследование и разработка глубоководных многосмесительных эрлифтных установок для подъема горных масс: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Донецк, 1983. – 28 с.
3. Weber M. Vertical hydraulic conveying of solids by air-lift // Journal of pipelines. – 1982. – № 3. – P. 137-152.
4. Гриффитс П., Уоллис Г. Двухфазное снарядное течение // Тр. Амер. об-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. – 1961. – Т. 83, № 3. – С. 99-114.
5. Chaziteodorou G., Schleffel S., Wiene A. Entwurf eines Abbauschemas zur Gewinnung und Förderung von Manganknollen aus der Tiefsee // Meerstechnik. – 1972. – № 2. – P. 56.
6. Полярский Ю., Плева Ф. Добыча марганцевых конкреций со дна морей и океанов с использованием пневмогидравлического транспорта // Preglad gorniczy. – 1982. – № 2. – P. 152-161.
7. 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.
8. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси // Наукові праці ДНТУ. Серія: «Гірничо-електромеханічна». – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 104. – С. 17-29.

9. Кириченко Е.А., Евтеев В.В., Романюков А.В. Исследование параметров снарядной структуры течения в подъемной трубе глубоководного эрлифта // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 9. – С. 66-72.

10. Модельная задача о транспортировании твердой частицы потоком водовоздушной смеси в эрлифте / Давидсон В.Е., Ламзюк В.Д., Кириченко Е.А., Евтеев В.В. // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 2(79). – С. 66-73.

11. Аналитическое решение циклической задачи применительно к снарядной структуре эрлифтного течения / Давидсон В.Е., Ламзюк В.Д., Кириченко Е.А., Евтеев В.В. // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 1(80). – С. 109-117.

12. К вопросу разработки численно-аналитического метода расчета глубоководных эрлифтов для гидроподъема твердого материала / Кириченко Е.А., Ламзюк В.Д., Евтеев В.В., Шворак В.Г. // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 8. – С. 83-88.