

УДК 67:532.528

Ю.А. ЖУЛАЙ, В.Ю. СКОСАРЬ

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Украина

КАВИТАЦИЯ КАК СРЕДСТВО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)

Выполнен краткий обзор по интенсификации технологических процессов и снижению удельного энергопотребления в различных отраслях промышленности с использованием эффектов гидродинамической и ультразвуковой кавитации. В качестве устройства, реализующего режим гидродинамической кавитации, рассматривается известная в системе регулирования ракетного двигателя трубка Вентури специальной геометрии, получившей название кавитационный генератор колебания давления жидкости. Он преобразует стационарное течение технологической жидкости в дискретно-импульсный поток и обладает простотой изготовления, отсутствием подвижных частей и передачи колебаний давления жидкости на насос, не требует дополнительных источников энергии и органично вписывается в существующее оборудование.

Ключевые слова: энергоэффективные технологии, кавитационный генератор колебания давления жидкости, периодически-срывная кавитация, гидроимпульсное воздействие, вибронгружение, ультразвук.

Введение

Постановка проблемы и её связь с научно-техническими задачами

Реализация ресурсосберегающих технологий для любого предприятия является одной из важных задач его производственно-хозяйственной деятельности. Особенно остро эта проблема встала перед руководителями хозяйствующего субъекта в условиях роста цен на энергоносители. В последнее время в мире наблюдается устойчивая тенденция в разработке технологий, основанных на использовании гидродинамической кавитации, способствующей их интенсификации и повышению энергоэффективности.

В работе [1] описаны примеры практического применения дискретно-импульсных струй, полученных посредством гидродинамической кавитации, для достижения позитивных результатов по интенсификации и ресурсосбережению различных технологических процессов:

– в металлургии – для удаления вторичной окалины пульсирующими струями при горячей прокатке металла;

– в машиностроении – для удаления заусениц и очистки различных поверхностей от ржавчины, загрязнений, старой краски;

– в химической промышленности – для эмульгирования жидкостей и диспергирования с использованием режимов периодически-срывной кавитации в потоке суспензии.

Известны исследования и разработки, направленные на интенсификацию технологических процессов в горнодобывающей отрасли [2]:

– при бурении наложением вибронгрузки на породоразрушающий инструмент;

– раскольматации водяных скважин за счет высокочастотного знакопеременного воздействия жидкости на капилляры породы продуктивной зоны.

Интенсивно ведутся работы по созданию гидроимпульсных технических средств для борьбы с газодинамическими явлениями в шахтах [3].

Практическое использование гидродинамической кавитации в этих отраслях позволяет снизить удельное энергопотребление до 50%.

Решение этих задач связано с получением дискретно-импульсной энергии большой мощности в потоке жидкости при помощи кавитационного генератора (КГ), создающего высокоамплитудные колебания в диапазоне звуковых частот. Это достигается только за счет соответствующей геометрии специального гидравлического канала, без использования каких-либо движущихся частей и дополнительных источников энергии [4].

О высокочастотном генераторе автоколебаний давления жидкости

При экспериментальном исследовании кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с трубкой Вентури с углами раскрытия диффузора $\beta = 15-60^\circ$, которые проводилось в Институте технической механики (ИТМ) НАН Украины [5], на

всех режимах работы трубки Вентури в широком диапазоне изменения параметра кавитации τ наблюдались высокочастотные кавитационные автоколебания. Параметр кавитации, как критерий динамического подобия кавитационного течения, определяется отношением давлений на выходе P_1 и входе трубки Вентури P_0 , т.е. $\tau = P_1 / P_0$. В числителе этого параметра значение давления, под действием которого каверна захлопывается, а в знаменателе – давление, определяющее скоростной напор потока в критическом сечении, в результате которого может образоваться и расширяться каверна.

Трубка Вентури со специальными геометрическими параметрами была названа кавитационным генератором, схема которого представлена на рис. 1.

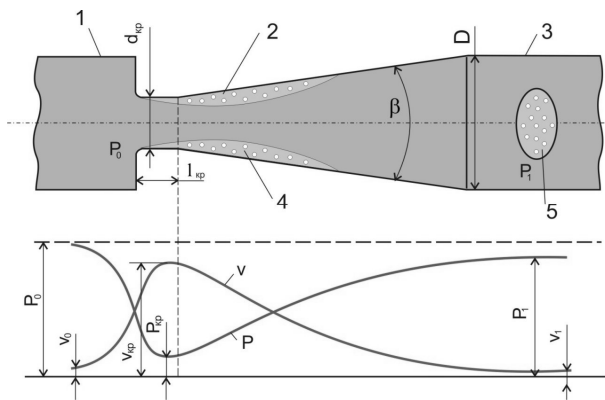


Рис. 1. Схема КГ с распределением давления и скорости потока вдоль него:
1 – входной трубопровод; 2 – КГ; 3 – выходной трубопровод; 4 – кавитационная зона;
5 – оторвавшаяся часть каверны

При подаче жидкости по напорному трубопроводу 1 на вход генератора 2 под давлением P_0 со скоростью v_0 в его критическом сечении происходит резкое падение давления и рост скорости движения жидкости до критических значений – $P_{кр}$ и $v_{кр}$, при которых возникает разрыв сплошности жидкости и образуется каверна 4, заполненная парами и выделившимся из жидкости газом. Оседлая каверна распространяется вдоль стенок критики и диффузора и, при достижении определенных размеров, отрывается от стенок КГ, сносится по потоку в зону повышенного давления 5 и захлопывается, создавая высокоамплитудное пульсирующее течение. Отличительной особенностью такого течения являются стабильность частоты роста и отрыва кавитационной каверны, расположенной в диффузоре, и её захлопывания (500 – 7000 Гц), а также отсутствие зависимости частоты колебаний от длины выходного трубопровода за местным сужением, которое указывает на неакустическую природу высокочастот-

ных колебаний. Вследствие негармонической формы колебаний, в дальнейшем использовалась величина размаха

$$\Delta P_1 = P_{1\max} - P_{1\min},$$

где $P_{1\max}$ и $P_{1\min}$ – максимальное и минимальное значения давления в импульсе за генератором.

В качестве примера, на рис. 2 (справа) приведена копия участка осциллограммы с записью параметров кавитационных автоколебаний, реализовавшихся в гидравлической системе, включающей КГ [5]. Здесь же (слева) представлена копия участка кинограммы с кавитационным течением в генераторе и трубопроводе за ним.

Использование такого типа устройства в качестве источника гидродинамических волн позволяет реализовать способ создания импульсов давления жидкости, в несколько раз превышающие по величине давление, получаемое на выходе насосной установки.

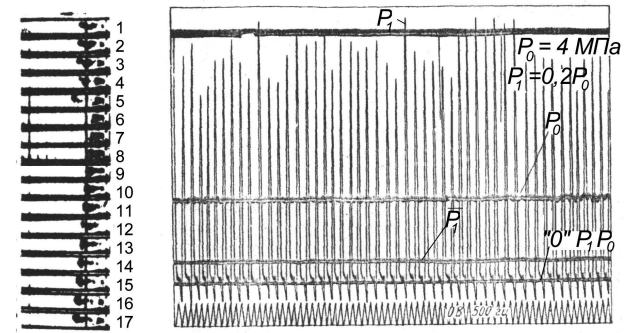


Рис. 2. Копия осциллограммы с записью давлений при испытаниях гидравлической системы, включающей КГ, и копия кинограммы процесса роста, отрыва и схлопывания кавитационной каверны

Анализ последних исследований и публикаций по использованию гидродинамической кавитации в промышленных технологиях

Впервые генераторы импульсов давления использовались ИТМ НАН Украины при разработке установок гидросбива окалины с заготовок нагретого металла Выксунского и Орско-Халиловского металлургических заводов [1]. Основным устройством установки гидросбива окалины является коллектор с форсунками (рис. 3).

На входе в коллектор устанавливается КГ. Основные конструктивные параметры установки определяются по заданному давлению питания и массовому расходу воды на один коллектор.

Преимущества использования кавитационных генераторов для этих целей заключалось в том, что режим периодически-срывной кавитации позволил

получить частоты колебаний в диапазоне 100-2000 Гц при максимальном уровне колебаний до 3 раз превышающего стационарное значение на входе в устройство. Применение разработанных установок с КГ позволило в два-три раза снизить брак по запрессовке окалины.

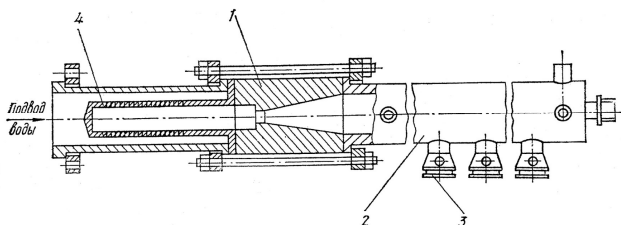


Рис. 3. Схема коллектора установки гидросбива окалины:
1 – генератор; 2 – коллектор, 3 – сопло; 4 – фильтр

Эффективность применения технологий с использованием пульсирующих струй для очистки корпусов судов от обрастаний доказана при проведении научно-исследовательской работы на Одесском судоремонтном заводе в 1984-1986 г.г.

Автоматизированная кавитационная установка для очистки вафельных конструкций обечаек топливных баков ракеты-носителя «Зенит», разработанная ИТМ НАН Украины, успешно эксплуатировалась ЮМЗ.

В Институте транспортных систем и технологий (ИТСТ) НАН Украины в рамках выполнения бюджетной темы были обоснованы рациональные гидродинамические параметры импульсного воздействия (частоты и величины импульсов давления) для **очистки от изношенных материалов покрытия** внутренней поверхности футерованных железнодорожных цистерн, предназначенных для перевозки агрессивных продуктов (рис. 4).

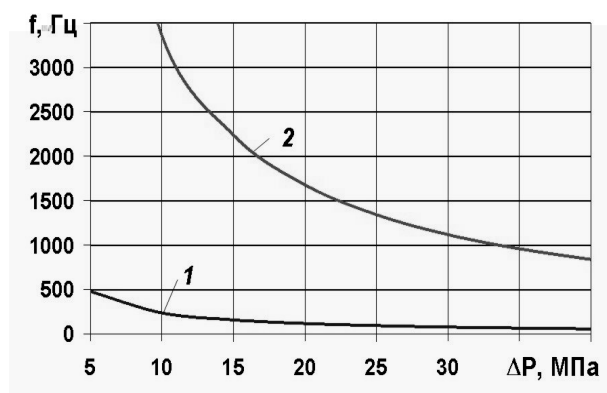


Рис. 4. Зависимости рациональной частоты следования импульсов от величины импульса давления: 1 – $E_{\max} = 10$ МПа – резина; 2 – $E_{\max} = 140$ МПа – материал подложки

Указанные зависимости позволили оптимизировать выбор режима работы КГ.

При проведении работ по оценке эффективности гидроимпульсной очистки внутренней поверхности цистерн от старого футеровочного покрытия установлено:

1. Применение КГ в технологическом процессе очистки внутренней футерованной поверхности цистерн в диапазоне изменения параметра кавитации 0,07 – 0,15 позволяет реализовать максимальные значения импульсов в 1,2÷1,8 раза превышающие давления питания, при частоте их следования от 1000 до 3000 Гц.

Гидроочистка футерованной поверхности пульсирующими (рис. 5) струями в промышленных условиях показала их высокую эффективность и качество очистки до класса Sa3 по ISO 8501 (чистый металл).



Рис. 5. Фотография участка поверхности очищенной пульсирующей струей

В то же время очистка стационарной струей (рис.6) позволяла достичь класса Sa2 (как видно из фотографии участка очищаемой поверхности стационарная струя не удаляет полностью остатки подложки), что не позволяет наносить новое покрытие.

Это требует механической доочистки поверхности или применение абразива в гидроочистке, что усложняет технологический процесс.

Применение КГ снизило удельные энергозатраты в технологических процессах по очистке цистерн в 1,5 раза. Это достигается за счет комплексного воздействия: увеличением энергии импульса (по сравнению со стационарной струей), уменьшением внутреннего трения и ростом скорости деформации разрушаемого слоя при циклическом погружении.

Известны примеры использования режимов периодически-срывной кавитации в химической промышленности для **эмульгирования и диспергиро-**

вания жидкостей. В представленной таблице приведены характеристики кавитационной установки, а также традиционных бисерной и шаровой мельниц для приготовления тонкодисперсных систем [6].



Рис. 6. Фотография участка поверхности очищенной стационарной струей

Таблица 1
Характеристики кавитационной установки (1), бисерной (2) и шаровой (3) мельниц для технологических процессов производства водоземulsionных красок

	1	2	3
Стоимость оборудования, руб.	4500	173042	38760
Производительность оборудования, т/ч	24	3,815	2,49
Энергоемкость оборудования, кВт·ч/т	2,5	56,8	24,8

Видно, что применение КГ позволило снизить удельные энергозатраты в 10 раз по сравнению с шаровыми и в 20 – с бисерными мельницами.

Примером успешного использования гидродинамической кавитации может служить **иницирование водяных скважин**.

Для увеличения дебита скважин, т.е. повышения их фильтрационных свойств, необходимо проведение комплекса технических мероприятий, связанных с процессами расколматаций продуктивных зон фильтров различными методами [2], характеризующихся различной степенью эффективности. Это: чистка стенок скважин шарошечными долотами, механическое воздействие вибраторами на колонну с фильтром, создание гидравлических ударов при использовании в качестве генератора пневматических (низкочастотных) устройств, кислотное воздействие на фильтр, взрыв в районе фильтра или (без фильтра) в зоне водоносного горизонта. В по-

следние годы начали применяться гидравлические свистки и магнитоотриксционные генераторы ультразвуковых колебаний. Не вдаваясь в глубокий анализ названных методов и средств, преимущества КГ очевидны. Он имеет длительный ресурс работы, т.к. не содержит быстроизнашиваемых элементов и подвижных частей и не требует дополнительных источников энергии.

При его использовании эффективность увеличения фильтрационных свойств продуктивных пластов значительно возрастает. Промышленными испытаниями доказано, что в технологических процессах расколматаций скважин с использованием КГ увеличивается степень проницаемости пласта. Это обусловлено образованием разветвленной сети пор и каналов за счет высокочастотного знакопеременного воздействия жидкости на капилляры породы, твердую фазу и фильтрат и эффективным выносом последних из продуктивной зоны. Дебит скважины, по величине которого производилось определение ее фильтрационных свойств, полностью восстанавливался или превышал исходный.

Известно, что при **бурении скважин** в твердых горных породах наложение вибронагрузки на породоразрушающий инструмент приводит к повышению технико-экономических показателей бурения.

Одним из эффективных способов бурения скважин является использование гидроударных машин. Однако, технические средства для его осуществления обладают рядом недостатков, главным из которых является сложность эксплуатации машин, связанная с наличием движущихся деталей и пружин, резиновых манжет, изнашивающихся в процессе эксплуатации, в связи с чем межсмотровой период не превышает 25 часов.

Одним из перспективных направлений, позволяющих исключить эти недостатки, является создание высокоамплитудных гидродинамических волн в трубопроводе за КГ [2] и преобразование их в механическое вибронагружение породоразрушающего инструмента.

На рис. 7 приведены схемы гидродинамических буровых снарядов (БС) для а – кернового и б – безкернового бурения. Генератор 2, используя энергию промывочной жидкости, подаваемой в скважину 4 и, преобразуя стационарный поток в дискретно-импульсный, создает высокочастотные продольные виброускорения на породоразрушающем инструменте 3.

Указанные БС прошли полный комплекс экспериментальных исследований на гидравлических и буровых стендах, а также в условиях сооружения гидрогеологических и геологоразведочных скважин.

На рис. 8 приведена копия участка осциллограммы с записью в реальном режиме времени па-

раметров экспериментального образца БС при его испытаниях на гидравлическом стенде.

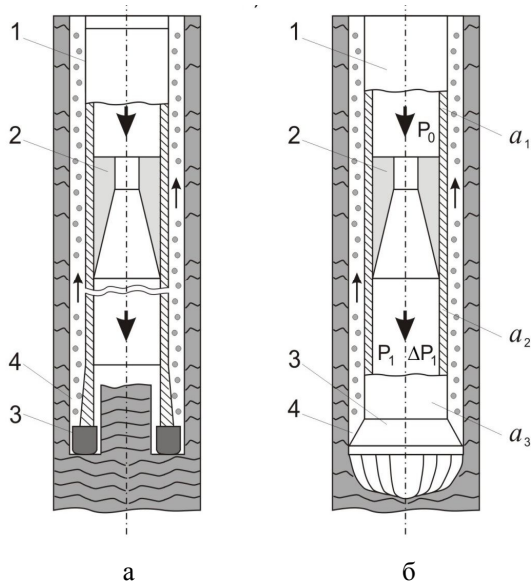


Рис. 7. Принципиальная БС:

1 – буровая колонна; 2 – КГ;

3 – породоразрушающий инструмент; 4 – скважина.

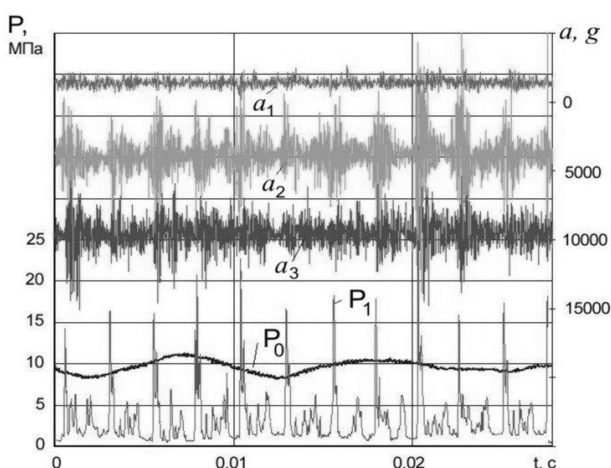


Рис. 8. Копия осциллограммы записи параметров при испытаниях экспериментального образца БС на гидравлическом стенде: $P_0 \approx 10$ МПа, $P_1/P_0 \approx 0,123$

Анализ результатов этих испытаний не оставляет сомнений в том, что в трубопроводе БС (за сечением выхода из генератора) реализуется режим периодически срывной кавитации с частотами в диапазоне до 3000 Гц с максимальным размахом колебаний давления жидкости ΔP_1 до $2,7 P_0$. Максимальные значения виброускорений на корпусе имитатора породоразрушающего инструмента составили 1600g (при $P_0 \approx 5$ МПа) и 2700g (при $P_0 \approx 10$ МПа). То есть, повышение давления подачи промывочной жидкости приводит к росту значений виброускорений на породоразрушающем инструменте.

Эффективность бурения с наложением вибронагрузки на породоразрушающий инструмент была подтверждена при сооружении гидрогеологических скважин большого диаметра (район Подольска, Московской области). Результаты сравнительного анализа бурения гидрогеологической скважины диаметром 190 мм показали, что при работе БС средний рост механической скорости бурения достигает 71,5% по сравнению со скоростью бурения роторным способом. При этом произошло снижение износа породоразрушающего инструмента и энергозатрат до 30%.

При бурении геологоразведочных скважин 76мм, гидродинамический БС обеспечил рост механической скорости бурения на 26,7% и ресурса работы коронки на 13,2% по сравнению с гидроударником Г76ВО. Анализ затрат мощности на вращение бурового инструмента на всех режимах бурения показал, что при работе гидродинамического БС происходит их снижение до 20%. БС обеспечивает улучшение стабилизации и устойчивости функционирования буровой колонны и породоразрушающего инструмента. Сравнительный анализ надежности работы гидродинамического БС и гидроударника Г76ВО показал, что за период испытаний было отмечено 4 отказа гидроударника и произведено 10 его сборок-разборок для регулировки и замены деталей. В то же время, за весь период испытаний не произошло ни одного отказа в работе гидродинамического БС. Осмотром и замером основных размеров деталей БС установлено отсутствие их износа. Это говорит о том, что ресурс работы гидродинамического БС значительно превышает ресурс гидроударника. С применением гидродинамического БС пробурена скважина глубиной 522 м и до этой глубины подтверждена его работоспособность.

Перспективные работы

1. Расширение диаметра обсадных труб

При разработке нефтяных и газовых месторождений, особенно глубоководных, одной из сложных задач является герметизация устья скважины. Традиционно эта трудоемкая операция выполнялась посредством закачки специальных цементных растворов со спуском оборудования на глубины 1000м и более. В последнее время западные фирмы применяют расширение диаметра обсадных труб скважин в зоне герметизации. Так фирма «Weatherford» выполняет расширение гидравлическим способом, путем подачи высоконапорного потока жидкости под расширительный конус. Из практики известно, что при таком расширении труб примерно 50% энергии жидкости расходуется на преодоление сопротивле-

ния трения, а 50% – на саму операцию расширения. При этом оптимизация технологического процесса расширения осуществляется путем уменьшения трения с помощью дорогостоящей специальной смазки MSDS с молибденовыми присадками, что приводит к значительным экономическим затратам.

Уменьшить трение возможно наложением вибронагрузки на расширяющий кон. Работа выполнялась ИТСТ НАН Украины в два этапа [2].

На первом – исследовались характеристики системы «вибратор – кон», что позволило сделать вывод о перспективности использования гидродинамического вибратора (ГДВ) в технологических процессах по расширению труб путем наложения вибронагрузки до 4000g с частотой $f = 3\text{--}12$ кГц на инструмент для расширения труб.

На втором – оценивалась эффективность применения ГИВ в технологии расширения труб.

На рис. 9 приведена схема гидравлического стенда для проведения испытаний по расширению труб с ГДВ.

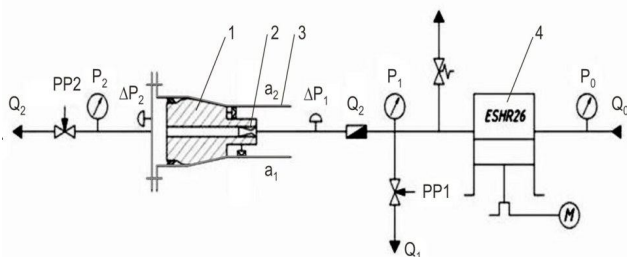


Рис. 9. Схема гидравлического стенда для проведения испытаний по расширению труб с ГДВ:

1 – кон; 2 – КГ; 3 – расширяемый трубопровод; 4 – насос; PP1 и PP2 дроссели; Q_2 – расходомер; ΔP_1 и ΔP_2 – датчики пульсаций; a_1 и a_2 – датчики виброускорений; P_0 , P_1 и P_2 – манометры

Для создания вибронагрузки на расширительном коне 1 использовался генератор 2, основные геометрические параметры которого определены по стандартным методикам и равны: – диаметр критического сечения $d_{кр} = 1,4$ мм; – угол раскрытия диффузора $\beta = 20^\circ$; – диаметр последиффузорного канала $D = 6$ мм.

Источником высокого давления 4 служила насосная установка с максимальным давлением 50 МПа и расходом 26 л/мин. Вода по напорному шлангу высокого давления через турбинный датчик расхода жидкости поступает в кавитационный генератор 3 и через центральный канал кона 2 и подпорный дроссель 5 сбрасывалась в емкость. Кон 1 – инструмент для расширения трубы представляет собой монолитную конструкцию с конической (10°) поверхностью, переходящей в цилиндрическую. Кон снабжен центральным каналом, в который с

входной стороны вкручивается КГ. На наружной поверхности имеются посадочные места для установки датчиков виброускорений.

Сравнительный анализ эффективности процесса расширения труб проводился путем создания гидродинамической вибронагрузки на инструменте и статическим нагнетанием жидкости с применением смазки и без нее.

Испытания проводились на образцах сертифицированных стальных труб с наружным диаметром 133 мм и толщиной стенки 6 мм.

На рис. 10 приведен фрагмент осциллограммы повышения среднего значения давления в камере перед коном P (левая ось) и осевой вибрации a (правая ось), реализуемых на коне, установленном в трубе.

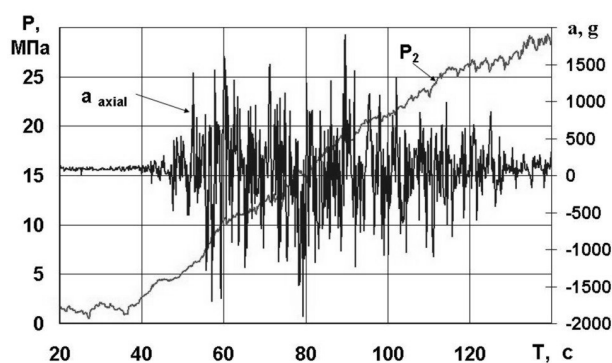


Рис. 10. Осциллограмма вибронагрузки на коне при его контакте с трубой

Из представленных данных видно, что вибронагрузка на коне для данной конструкции ГИВ реализуется в диапазоне изменения параметра кавитации $\tau = 0,15 \div 0,65$.

Испытания по расширению труб проводились при следующих условиях:

Опыт 1 – статическое воздействие без смазки.

Опыт 2 – статическое воздействие со смазкой MSDS.

Опыт 3 – гидроимпульсный способ, при котором реализуются пульсации давления жидкости на выходе генератора, близкие к максимальным.

Опыт 4 – гидроимпульсный способ, при котором реализуются вибронагрузки на коне, близкие к максимальным.

На рис. 11 представлены совмещенные копии участков осциллограмм средних значений давления перед коном при различных условиях проведения эксперимента, которые позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование гидроимпульсного способа расширения труб, при котором реализуются вибронагрузки на коне, близкие к максимальным, существенно уменьшает (на 93%) сопротивление трения

по сравнению с расширением статическим воздействием и снижает значение давления, при котором перед коном с 26,9 МПа до 14,4 МПа.

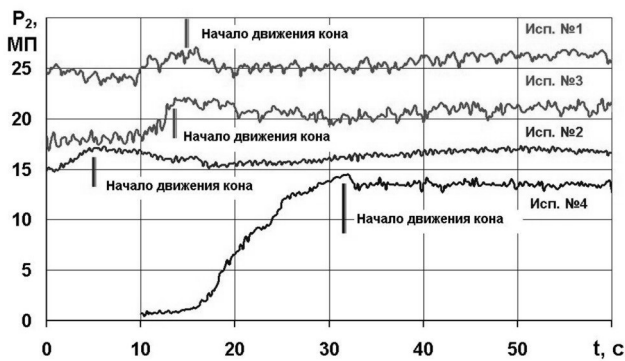


Рис. 11. Совмещенные копии участков осциллограмм средних значений давления перед коном

2. Установлено, что гидроимпульсный способ нагнетания жидкости предотвращает появление задиров и наклепов, а также заклинивание инструмента для расширения труб – кона.

3. Анализ полученных результатов подтвердил перспективность использования ГДВ в технологических процессах по расширению труб путем наложения виброускорений на инструмент для расширения.

4. Наружный диаметр труб после расширения находится в диапазоне от 150,18 до 150,62 мм с толщиной стенки 5,7 мм, при этом эллипсность труб составляет 0,09 – 0,44 мм. Измерение конструктивных параметров кона после каждого испытания, за исключением первого опыта, показало их стабильность и отсутствие повреждений рабочей поверхности.

2. Борьба с внезапными выбросами в шахтах

Увеличение добычи угля из газообильных пластов, залегающих на больших глубинах, сдерживается основным природным барьером их безопасной разработки – газодинамическим фактором. Внезапные выбросы, взрывы метана и угольной пыли приводят к катастрофическим последствиям.

В настоящее время одним из основных способов борьбы с газовым и пылевым факторами является гидрорыхление угольного пласта нагнетанием жидкости в статическом режиме. Однако, с увеличением глубины разработки месторождений, эффективность такого мероприятия сдерживается наличием пород, склонных к размоканию, обрушению и пучению, и формированием впереди забоя выработки зон разгрузки и повышенного горного давления.

Одним из перспективных направлений, позволяющих повысить качество гидрорыхления, является

создание высокоамплитудных гидродинамических волн в трубопроводе за кавитационным генератором и преобразование их в механическое вибронагружение угольного пласта.

В последние годы значимые результаты в этом направлении получены Институтом геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины [3] совместно с ПАО «Краснодонуголь». Лабораторные исследования погружного устройства гидроимпульсного воздействия (УГИВ) на модели скважины показали, что при давлении нагнетания от 5,0 до 30,0 МПа с расходом жидкости 30-70 л/мин рабочий диапазон частоты автоколебаний составляет от 1 до 7 кГц. Максимальный размах автоколебаний давления жидкости, наложенный на величину подпора, соизмерим с давлением нагнетания. В результате горно-экспериментальных работ и оценки эффективности применения УГИВ, расположенного в скважине (рис. 12), при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов в забое подготовительной выработки установлено:

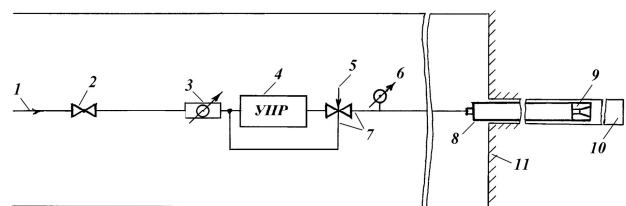


Рис. 12. Принципиальная схема монтажа оборудования в забое подготовительной выработки:

- 1 - водопровод; 2 - вентиль; 3 - расходомер;
- 4 - насосная установка; 5 - кран; 6 - манометр;
- 7 - высоконапорный рукав; 8 - гидрозатвор;
- 9 - УГИВ; 10 - скважина; 11 - забой выработки

– конструкция УГИВ при нагнетании жидкости в диапазоне давлений от 10,0 до 20,0 МПа со скоростью нагнетания от 40 до 60 л/мин обеспечивает эффективное рыхление и дегазацию выбросоопасных угольных пластов в зонах с низкой гидравлической проницаемостью. Безопасная зона выемки угля возрастает с 4 до 10м;

– рыхление массива за зоной максимального опорного горного давления осуществляется без проявления гидроразрыва и протекания воды по сечению пласта в забое выработки;

– сравнение статического и импульсного нагнетания жидкости показало, что при гидроимпульсном воздействии длительность нагнетания жидкости до завершения активного процесса гидрообработки пласта снижается до 50%, а расход жидкости до 60%. В процессе ведения работ признаки ГДЯ не наблюдались;

– применение импульсного режима нагнетания обеспечивает соблюдение критерия безопасного

ведения горных работ – величина давления в фильтрационной камере скважины не превышает давление гидроразрыва пласта, при этом позволяет управлять процессом трещинообразования в нем.

3. Ультразвуковая обработка литейных сплавов в аккумуляторном производстве

Перспективным направлением повышения механических характеристик литейных сплавов является их обработка ультразвуком. Считается, что процессы, происходящие при воздействии ультразвука на жидкий и твердожидкий сплав, определяются главным образом кавитацией. Кавитация разрывает сплошность в расплаве, разрушает первичные кристаллы, перемешивает расплав, удаляет растворенные газы. В результате перемешивания расплава, исчезновения ликвационных неоднородностей, диспергирования даже плохо растворимых легирующих элементов достигается гомогенизирующий эффект. Измельчается зерно кристаллизующегося сплава, дробятся частицы интерметаллидов, существенно повышается прочность и пластичность литейных сплавов [7,8].

Это может найти применение в аккумуляторной промышленности, ведь разработчики и создатели свинцово-кислотных аккумуляторов заинтересованы в повышении механических и электрохимических свойств свинцовых сплавов. Одним из реальных путей решения этих задач является минимизация в металлах неметаллических включений, прежде всего окислов, соединений серы, шлаковых частиц, газовых примесей и др. Однако, нам неизвестны работы, развивающие это направление.

Сотрудниками ИТСТ НАН Украины совместно с ПАО «ВЕСТА-Днепр» проведены исследования очистки свинцовых сплавов ультразвуком. В экспериментальном котле объемом 285 см³ обрабатывались некоторые аккумуляторные свинцовые сплавы ультразвуком, частотой 20-22 кГц, возбуждаемым генератором типа УЗГ2-1М. В качестве устройства, контролирующего наличие колебаний и фиксирующего порог кавитации, использовали осциллограф типа С1-94. Обнаружено, что после воздействия ультразвуком в течение 3-4 мин, при мощности колебаний выше порога кавитации (примерно 200 Вт на 100 см³ расплава), кристаллизовавшиеся сплавы заметно повышали механические свойства. Например, свинцовый сплав, содержащий мас. % 3,236 сурьмы, 0,353 олова, 0,132 мышьяка, после ультразвуковой кавитационной обработки показывал увеличение временного сопротивления деформации (предела прочности на разрыв) σ_b от 27,62 до 38,40 Н/мм², а относительного удлинения δ - от 3,65 до 7,25%. А свинцовый сплав, содержащий мас.% 0,280

олова, 0,090 кальция, 0,012 алюминия, после ультразвуковой кавитационной обработки демонстрировал увеличение σ_b от 35,90 до 42,20 Н/мм², а δ – от 18,60 до 24,30%. В процессе обработки наблюдалось всплывание неметаллических включений на поверхность расплава в виде пленки зеленовато-бурого оттенка, которую удаляли шумовкой. Анализ на содержание элементов, проведенный на оптическом эмиссионном спектрометре ARL 3460, подтвердил наличие в пленке окислов свинца и окислов легирующих элементов. Так что, увеличение прочности и пластичности сплавов, вероятно, произошло за счет удаления из него неметаллических включений, главным образом, окислов свинца и окислов легирующих элементов – олова, сурьмы, мышьяка, кальция.

Заключение

1. Эффективность использования гидродинамической кавитации подтверждена разработками способов и устройств по интенсификации промышленных технологий:

- гидросбива окалины при прокатном производстве металла;

- очистке различных поверхностей от ржавчины, загрязнений, заусенец в машиностроении;

- эмульгирования жидкостей и диспергирования в химической промышленности;

- в горнодобывающей отрасли – для интенсификации процессов бурения и расширения диаметра обсадных труб, раскольматации скважин, гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов.

2. Кавитационный генератор, обладает рядом преимуществ перед другими техническими средствами волнового воздействия:

- простота изготовления, отсутствие подвижных частей, дополнительных источников энергии и передачи колебаний жидкости на насос;

- конструкция кавитационного генератора органично вписывается в существующее оборудование и позволяет интенсифицировать техпроцессы при более низких удельных энергозатратах.

3. Показано, что кавитационные процессы, возбуждаемые ультразвуком мощностью выше порога их возникновения, повышают механические характеристики литейных свинцовых сплавов, применяемых в аккумуляторном производстве.

Литература

1. Pilipenko, V.V. Cavitation self-oscillations intensify technological processes [Text] / V.V. Pilipenko, I.K. Man'ko, V.A. Zadontsev // *Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop*. – Kiev, Ukraine. Report 827, 1998, – P. 32-1 – 32-4.

2. *Hydrodynamic cavitation in energy-saving technological processes of mining sector [Text] / Y. Zhulay, V. Zberovskiy, A. Anglovskiy, I. Chugunkov // Geomechanical Processes During Underground Mining Taylor & Francis Group, London, 2012. – P. 51 – 56.*

3. Пат. 87038 Україна, МПК E21F 5/02. Пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільний пласт [Текст] / Л.М. Васильєв, Ю.О. Жулай, В.В. Зберовський, П.Ю. Моїсеєнко, М.Я. Трохимец; заявник і патентовласник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – № а200710209; заявл. 13.09.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11. – 4 с.

4. А.с. 504444 СССР, МКИ В 06 В 1/18. Генератор колебаний давления воды [Текст] / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, И.К. Манько, Н.И. Довгоцько, В.А. Дрозд (СССР). – № 1782997; заявл. 06.05.1972; опубл. 05.02.1976, Бюл. № 9. – 4 с.

5. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания: моногр. [Текст] / В.В. Пилипенко. – К.: Наук. думка, 1989. – 316 с.

6. Жулай, Ю.А. Гидродинамическая кавитация в технологических процессах приготовления тонкодисперсных систем [Текст] / Ю.А. Жулай, Н.А. Дзоз // Дисперсные системы. Материалы XXIV науч. конф. стран СНГ 20-24 сентября 2010. – Одесса, 2010. – С. 115 – 116.

7. Воздвиженский, В.М. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении [Текст]: учеб. пособие для машиностроительных вузов / В.М. Воздвиженский, В.А. Грачев, В.В. Спасский. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.

8. Физика и техника мощного ультразвука. Физические основы ультразвуковой технологии. Т. 3. [Текст] / под. общ. ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

Поступила в редакцию 18.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.Е. Калинина, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск.

КАВИТАЦІЯ ЯК ЗАСІБ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ Й ПЕРСПЕКТИВИ (ОГЛЯД)

Ю.О. Жулай, В.Ю. Скосарь

Виконано короткий огляд по інтенсифікації технологічних процесів і зниженні питомого енергоспоживання в різних галузях промисловості з використанням ефектів гідродинамічної й ультразвукової кавітації. Як пристрій, що реалізує режим гідродинамічної кавітації, розглядається відома в системі регулювання ракетного двигуна трубка Вентурі спеціальної геометрії, що одержала назву кавітаційний генератор коливання тиску рідини. Він перетворює стаціонарний потік технологічної рідини в дискретно-імпульсний і має простоту виготовлення, відсутність рухливих частин і передачі коливань тиску рідини на насос, не вимагає додаткових джерел енергії й органічно вписується в існуюче встаткування.

Ключові слова: енергоефективні технології, кавітаційний генератор коливання тиску рідини, періодично-зривна кавітація, гідроімпульсний вплив, вібронавантаження, ультразвук.

HYDRODYNAMIC CAVITATION AS A TOOL TO INTENSIFY PRODUCTION PROCESSES. EXPERIENCE OF USAGE AND PROSPECTS (REVIEW)

Yu.A. Zhulay, V.Yu. Skosar

Intensification of production processes and reduction of energy intensity in various industries have been reviewed using effects of hydrodynamic and ultrasound cavitation. A specially shaped Venturi tube, famous in the system of rocket engine control, named as a cavitation oscillator of fluid pressure is considered as a means to fulfill a mode hydrodynamic cavitation. It transforms steady-state flow of the production process fluid into discrete-pulse flow and features a simplicity in manufacture, has no moving parts and transmission of fluid oscillations on a pump; besides it does not require any extra sources of energy and is well assembled inscribed organically into current equipment.

Key words: power-efficient technologies, cavitation oscillator of fluid pressure, periodically-stall cavitation, hydroimpulsive effect, vibrational loading, ultrasound.

Жулай Юрий Алексеевич – вед. науч. сотр. Института транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: zhulay@westa-inter.com.

Скосарь Вячеслав Юрьевич – ст. науч. сотр. Института транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: svu@westa-inter.com.