

характер. Экспериментально было установлено, что разрушение композиционного материала происходит при появлении в поверхностном

слое металла линейных деформаций порядка $\varepsilon_{кр} = 0,25 - 0,35\%$. В этом случае микронеоднородные пластические деформации металла и изменение рельефа приводят к разрушению адгезионной связи, т.е. участки поверхностного слоя металла являются концентраторами напряжений, которые резко снижают прочность металлополимерного элемента. Прочность этого элемента оценивалась по линейным деформациям поверхностного слоя металла. Величина деформации была стабильной при различных значениях нагружения и соотношениях толщин покрытия и металла, а величина разрушающей нагрузки соответствовала расчетной. Это подтверждает правильность принятой гипотезы об оценке прочности металлополимерного материала по величине удлинения металла на границе раздела фаз, позволило подтвердить роль микронеоднородных пластических деформаций в разрушении адгезионной связи и упрочняющее действие покрытия за счет уменьшения значения таких деформаций, т.е. выявлен один из механизмов разрушения металлополимерного материала и факт повышения предела текучести поверхностного слоя металла.

Главным звеном, обуславливающим прочность металлополимерного элемента при изгибе, является характеристика сцепления между подложкой и покрытием. Момент потери устойчивости сжатого слоя покрытия определяется характером связи с подложкой, и, прежде всего, прочностью и деформативностью адгезионного слоя. Однако, потеря устойчивости в сжатом слое покрытия еще не определяет момента начала разрушения композиционного материала при изгибе, так как отрыва армированного полимерного покрытия от подложки еще не произошло и элемент работает в монолитном состоянии. Нормальный отрыв покрытия после потери устойчивости наступает в момент достижения отрывающими усилиями предела прочности сцепления между подложкой и покрытием. Сжатие чаще всего приводит не к непосредственному разрушению металлополимерного элемента по адгезионному слою, а к потере устойчивости сжатого слоя покрытия.

Небольшое различие в свойствах и характере разрушения покрытия при растяжении и сжатии обусловлено потерей устойчивости сжатого слоя из-за его недостаточной адгезионной связи с подложкой.

Испытания показали, что наибольшему разрушению армированное полимерное покрытие подвергается на деформируемой подложке. Изгиб и растяжение образцов свидетельствуют о том, что еще до достижения величины предела прочности материала подложки покрытие отслаивается. Это одинаково характерно и для зоны сжатия и для зоны растяжения.

Наличие касательных напряжений между слоями подложки и покрытия значительно уменьшает адгезионную прочность при нормальном отрыве, приводя к потере устойчивости сжатых слоев материала покрытия при значительно меньших напряжениях сжатия, т.е. имеет место зависимость разрушающего напряжения в условиях поперечного изгиба сосредоточенной силой от соотношения длины и поперечного композиционного элемента.

Таким образом, разрушение металлополимерного материала при изгибе определяется, в основном, адгезионной прочностью покрытия с подложкой при нормальном отрыве. Разработанные нами реакционноспособные поверхностно-активные вещества обеспечивают уровень адгезионной прочности выше когезионной прочности полимера. Кроме того, большое влияние на прочность металлополимерного элемента оказывает величина адгезионной прочности полимера к волокнам стеклоткани, в связи с чем для аппретирования стеклонитей следует использовать прямые замасливатели.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К.А.Забела, Р.А.Веселовский, Ю.К.Значков. Ремонт подводных трубопроводов с помощью клеев, М. «Недра», 1978г, 176с
2. И.Г.Манец, Р.А.Веселовский. Полимерные композиционные материалы в горном деле. М., «Недра». 1988, 375с.
3. С.И.Корягин. Применение полимерных материалов при ремонте судовых конструкций и деталей механизмов рыбопромысловых судов. Калининград: Всесоюзный институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбной промышленности и хозяйства., 1992, 131 с.
4. Р.А.Веселовский. Физическая химия многокомпонентных полимерных систем, том 1, Наукова Думка, Киев, 1986, 375с.
5. С.И.Корягин, И.Г.Манец. Исследование листовых элементов из армированного полимерного покрытия при действии равномерно-распределенной нагрузки. Вестник машиностроения, 1985, №11, с. 42-43
6. Р.А.Веселовский. Регулирование адгезионной прочности полимеров., Наукова Думка, Киев, 1988, 176с.
7. R.A.Veselovsky, V.N.Kestelman. Adhesion of Polymers, McGraw Hill, New-York, 2003, 500с.
8. У.Ф.Хаббард. Волокнистые композиционные материалы. М., «Химия», 1967, 248с.

УДК 533.6.013.42; 696.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ГИБКОГО СТЕРЖНЯ

В.Е. Волкова к.т.н., доцент

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск

В статье представлены результаты исследования вынужденных полигармонических колебаний гибкого стержня. Выполнен анализ влияния формы внешнего возмущения на динамическое поведение системы. Получены временные процессы, фазовые траектории и спектральные характеристики наиболее характерных динамических режимов, построены амплитудно-частотные зависимости.

1. Введение

Экспериментальному исследованию колебаний стрелочных систем посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов [1-4]. Первые две из приведенных работ направлены на решение прямых задач динамики. Две других [3,4] посвящены изучению суб- и ультрагармонических колебаний выпущенного стержня при кинематическом возмущении, вопросам их установления и устойчивости. Натурное исследование хаотических колебаний гибких пологих арок при кинематическом возмущении представлено в работе [3]. Данные исследования имеют существенный прикладной и методический интерес. Из общего анализа данных работ явствует, что экспериментальные работы проводились параллельно с развитием методов расчета стержневых систем.

Испытания стержня выполнялись в лаборатории кафедры мостов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В.Лазаряна.

Цель экспериментального исследования вынужденных колебаний сжатого стержня, имеющего два устойчивых положения равновесия, состояла в изучении вопросов существенных при исследовании динамического поведения гибких стрелочных:

- определении динамических характеристик свободных колебаний стержня;
- построении амплитудно-частотных характеристик вынужденных колебаний;
- изучении форм колебаний;

1. Измерительный стенд

Для решения поставленных выше задач, был разработан и изготовлен стенд и создана модель. Корпус стенда является неподвижной частью, которая позволяет осуществлять прикрепление всех остальных элементов. Стенд представляет собой систему ригелей, стоек и подкосов. Детали стенда соединяются между собой на болтах, что позволяет плавно изменять расстояние между стойками и ригелями. Стержень крепился на болтах к корпусам подвижной и неподвижной опоры. Во время сборки модели, монтажа стоек, ригелей и опорных частей, особое внимание уделялось центровке элементов, с целью предотвращения появления эксцентриситетов.

2. Модель

Стержень был выполнен из полосы пружинной стали длиной $l_1 = 2 \text{ м}$ и размерами поперечного сечения $b \times h = 0.05 \times 0.056 \text{ м}$. Расстояние между опорными отверстиями составляло $l = 1.955 \text{ м}$. Геометрические характеристики сечения стержня равны: площадь сечения $A = 2.8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и момент инерции $I = 7.32 \cdot 10^{-10} \text{ м}^4$.

Модуль упругости материала стержня определялся путем статического многоуровневого нагружения прямолинейного стержня в средней по его

длине точке. Нагружение проводилось грузами массой 1кг. Значения прогибов фиксировались прогибомером Аистова, имеющего цену деления 0.01мм. Показания прогибомера фиксировались для 5 ступеней последовательного нагружения и пяти ступеней разгрузки стержня. Отклонение полученного значения $E = 2.07 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ от нормативного $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ составляет 1.4%, что является допустимым.

С целью увеличения инерционных характеристик, стержень дополнительно был нагружен грузами с массой 1кг, расположенных на равных расстояниях относительно средней по длине стержня точки от неподвижной опоры.

Для исследования вынужденных колебаний гибкой пологой арки на стадии сборки модели, стержню предавалось начальное продольное усилие сжатия. Величина усилия осевого сжатия принималась большей эйлеровой силы потери устойчивости. После обжатия прямолинейная форма продольной оси стержня становилась неустойчивой.

3. Генератор возмущений

Параметры внешнего возмущения оказывают существенное влияние на колебательные режимы гибких стрелочных систем. При проведении эксперимента, особое внимание уделялась возможности регулировать и фиксировать параметры внешнего возмущения.

В качестве генератора внешнего возмущения был использован двигатель постоянного тока, позволяющий плавно изменять частоту вращения. Масса двигателя составляла 2кг. Крепление генератора к стержню выполнялось с помощью струбины. Учитывая возможность установления суб- и ультрагармонических колебаний, а так же для удобства построения амплитудно-частотных характеристик, в эксперименте фиксировалась частота вращения двигателя. Для этой цели был использован геркон, который крепился к корпусу двигателя. Частота внешнего периодического возмущения фиксировалась одним из портов многоканальной тензоусилительной установки.

Величина амплитуды внешнего моногармонического возмущения зависела от скорости вращения двигателя и определялась по формуле

$$F = m_i a = m_i \omega^2 R_i, \quad (1)$$

где m_i - масса эксцентрика, a - центробежное ускорение, ω - частота вращения двигателя, R_i - радиус вращения эксцентрика.

В эксперименте были использованы два эксцентрика, имеющих следующие характеристики $R_1 = 11.4 \text{ см}$, $m_1 = 0.358 \text{ кг}$ и $R_2 = 10.7 \text{ см}$, $m_2 = 0.125 \text{ кг}$.

4. Комплект измерительной аппаратуры

Для исследования вынужденных колебаний гибкого стержня был использован комплект измерительно-регистрающей аппаратуры, в состав

которого входили средства регистрации, преобразования, хранения сигналов, а также персональный компьютер. Применение компьютера позволило автоматизировать процедуру численной обработки, дало возможность применять стандартные графические пакеты для представления сигналов.

Амплитуды колебаний точек стержня регистрировались проволоочными тензодатчиками. Они весьма широко применяются в технике механических измерений. Их используют не только для измерения напряжений, но и в качестве промежуточных элементов. Тензодатчики, использованные в эксперименте имели следующие характеристики: базу 10мм и сопротивление 201.6 Ом. Одним из недостатков проволоочных тензодатчиков заключается во влиянии поперечных деформаций на точность измерений. Для компенсации данного явления тензодатчики используются в группах – розетках. Наклейка датчиков осуществлялась по схеме полумост.

Для исследования форм колебаний гибкого стержня датчики были наклеены в точках, расположенных на расстояниях $1/8; 3/8; 1/2; 3/4 l$ от неподвижной опоры. Схема расположения измерительной аппаратуры представлена на рис. 1.

Тарировка тензодатчиков выполнялась до передачи сжимающего усилия на стержень. Статическая нагрузка, действующая на прямолинейный стержень состояла из равномерно-распределенного собственного веса и двух сосредоточенных грузов, имеющих массу 1кг, и расположенных на равном расстоянии относительно средней по длине стержня точки.

Сигналы от тензодатчиков для усиления поступали на входы тензоусилительной установки ТУП-12, а затем передавались на магнитограф типа TEACR -71. Применение магнитографа позволило получать записи сигналов в непрерывно форме, с возможностью их неоднократной последующей их обработки.

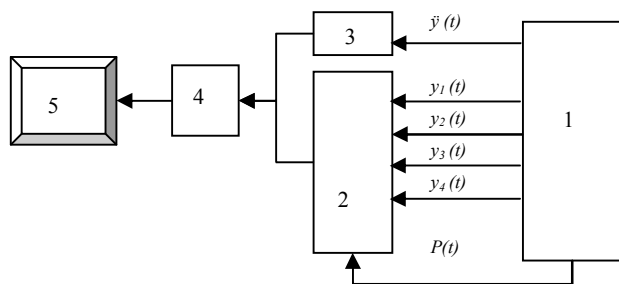


Рис. 1. Схема расположения измерительной аппаратуры: 1- модель; 2 – тензоусилительная установка; 3- масштабный усилитель; 4- магнитограф; 5 – персональный компьютер.

Измерение вертикальных ускорений в средней по длине стержня точке выполнялось посредством датчиков вертикальных ускорений АС-2, изготовленных на базе интегрального датчика ускорений ADXL105. Тарировка

датчика ускорений выполнялась путем его аретировки. Коэффициент преобразования для датчика вертикальных ускорений $0.0011 мс^{-2} (мВ)^{-1}$. Сигналы от датчика вертикальных ускорений передавались на масштабный усилитель ТМА-32, имеющий полосу пропускания 0...20Гц. Усиленный сигнал поступал на запись на один из каналов магнитографа.

Для преобразования аналогового сигнала, записанного магнитографом, в дискретную форму был использован АЦП. Частота квантования сигнала была принята 200Гц. Сигналы, преобразованные в цифровой файл, хранились на жестком диске компьютера. Для первичной обработки данных: умножение и деление показаний датчиков на переходные коэффициенты, вычитания поправок на уход нуля использовалось специальное программное обеспечение.

5. Анализ свободных колебаний. Определение собственных частот и декремента колебаний

Исследуемая модель является нелинейной существенно несимметричной системой. Она имеет два устойчивых несмежных положения равновесия. В эксперименте, характеристики свободных колебаний, а именно собственные частоты определялись отдельно для каждого из равновесных состояний. В эксперименте свободные колебания возбуждались двумя способами – внезапной остановкой генератора колебаний и приложением ударной нагрузки в средней по длине стержня точке.

Различают несколько основных способов определения декрементов колебаний. А именно: для систем с несколькими степенями свободы – по ширине резонансных кривых – годографу частоты, и для систем с одной степенью свободы – из анализа переходных режимов колебаний. Последний из способов является наиболее простым в исполнении.

При определении динамических характеристик свободных колебаний первые два периода колебаний не принимались во внимание, так как на них существенное влияние оказывают переходные процессы. Остальная часть осциллограммы подчиняется общей закономерности. Собственные частоты колебаний относительно каждого из режимов колебаний составили $\omega_n = 12.5 \text{ рад/с}$ и $\omega_s = 13.9 \text{ рад/с}$, а декремент колебаний - $\delta = 0.074$.

6. Определение формы колебаний

Форма колебаний измерялась посредством регистрации сигналов на протяжении всего эксперимента. Формы изгибных колебаний определялись путем одновременной записи сигналов всех пяти тензодатчиков. Изучение осциллограмм показывает, что фазы колебаний для всех точек стержня одинаковы, а амплитуды колебаний возрастают от крайних сечений к среднему. Следовательно, стержень во время колебаний принимает форму одной полуволны синусоиды. Таким образом, для заданного типа и параметров внешнего возмущения в исследуемой механической системе возможны колебания только первой формы.

7. Анализ вынужденных колебаний гибкого стержня

В ходе эксперимента для каждого из эксцентров фиксировались значения перемещений и ускорений системы, как при увеличении частоты вращения, так и при ее уменьшении. Это позволило установить критические

значения частот, соответствующие резонансным режимам колебаний, а также границы диапазонов частот существования отдельных режимов колебаний (см.рис.3).

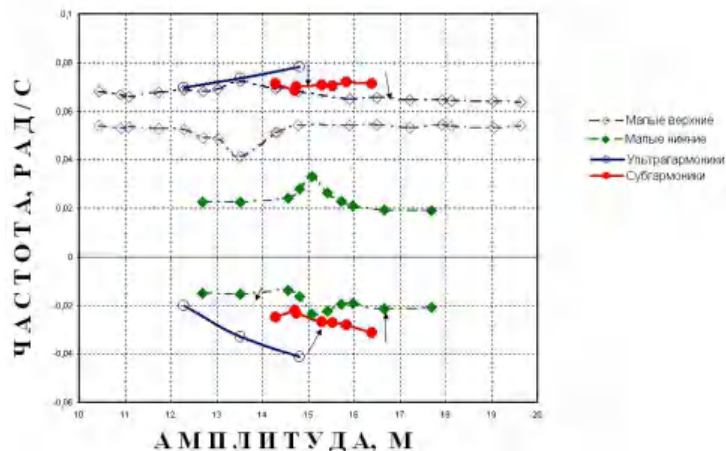


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика колебаний стержня

Принимая во внимание возможность существования нескольких устойчивых режимов колебаний на фиксированных частотах внешнего возмущения, в экспериментах изменялись начальные условия.

Длина англизируемых реализаций была принята равной $30T$, где T - период внешнего возмущения, в допущении, что длина самой низкочастотной составляющей 6ω . С целью проверки стационарности колебательных процессов, реализации разделялись на несколько равных интервалов, для каждого из которых определялись величины средних значений и дисперсии.

На рис. 2 представлены экспериментальные точки, которые определяют зависимость вынужденных колебаний стержня от частоты внешнего возмущения для колебаний как на частоте внешнего возмущения так и на суб- и ультрагармонических тонах. Анализ полученных осциллограмм показал, что при установлении достаточно малой амплитуды колебаний наблюдались режимы «малых» колебаний относительно одного из двух устойчивых положений равновесия. Увеличение амплитуды колебаний приводило к установлению больших ультрагармонических колебаний на четных гармониках. Устойчивость данного вида колебаний объясняется существенной несимметрией системы.

В диапазоне частот внешнего возмущения $\omega = 14.5 \dots 16.5 \text{ рад/с}$ наблюдались устойчивые режимы субгармонических колебаний стержня. Осциллограммы и фазовые траектории для колебаний на субгармонике порядка $\omega/3$ представлены на рис. 3. влияние субгармонических колебаний

на структуру фазовой траектории (y, \dot{y}) состоит в появлении самопересечений. При этом количество петель равно порядку субгармоники – трем.

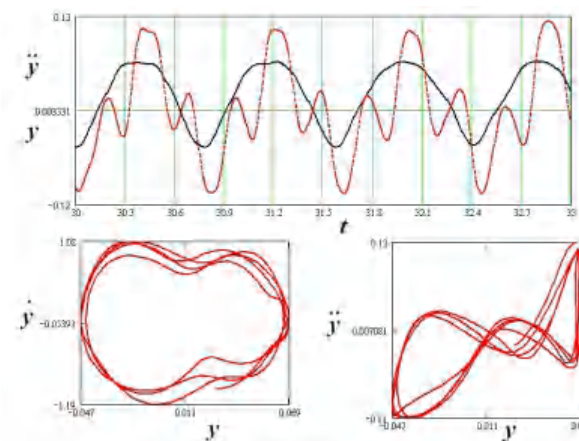


Рис. 3. Временные процессы и фазовые траектории субгармонических колебаний стержня

Представленные на рис.3 фазовые траектории типологически подобны траекториям, полученным для несимметричных систем с двумя потенциальными ямами.

Выводы

Выпученный стержень при малых амплитудах внешнего возмущения до появления режимов прощелкивания проявляет свойства системы с «мягкой» характеристикой упругой силы, а для режимов прощелкивания – систем с «жесткой» характеристикой. Влияние сил тяжести приводит к несимметрии системы. Равновесные положения системы несимметричны относительно прямолинейного положения. Максимальное значение частот «малых» колебаний относительно нижнего и верхнего положений равновесия не равные. Влияние трения в опорных частях стержня вызывает увеличение значения декремента колебаний.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Kulisiewicz M. Modelling and identification of non-linear mechanical systems under complex load. – Wrocław (Poland):Oficina wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005. – 190p.
2. Plaut R.H., Johnson E.R The Effect of Initial Thrust and Elastic Foundation in the Vibration Frequencies of a Shallow Arches. // J. Sound and vibration.- 1981.- 78, №4.- P.565-571.
3. Tseng W.Y., Dugundji J. Non-linear vibrations of a beam under harmonic excitation.// Transaction ASME.- 1971.-Vol.37,71. -P.471-477.

4. Tseng W.Y., Dugundji J. Non-linear vibrations of a buckled beam under harmonic excitation. // Transaction ASME.- 1971.-Vol.38,71. - P.467-476.

УДК 666.972.12

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ НА ОБОГАЩЕННЫХ ЗЕРНИСТЫХ ПЕСКАХ

Б.Д. Гваджаиа, с.н.с

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
г. Днепрпетровск*

Проведенные исследования подтвердили необходимость разработки технологических мероприятий по использованию мелкозернистых песков в гидротехническом и гражданском строительстве. Комплекс технологических мероприятий направлен на специальную подготовку и модификацию свойств мелкого наполнителя гидротехнического бетона. Сюда относятся также разработка способов приготовления и введение в бетонную смесь комплексной добавки заданной концентрации.

На основании изложенного, можно сделать вывод о том, что особенности технологии гидротехнического бетона заключаются в следующем:

- а) использование способов отделения песчаных частиц (размером более 0,14 мм) от пылеватых;
- б) обогащение и модификации поверхности мелкого заполнителя;
- в) организация на бетоносмесительных узлах специальных приспособлений для подготовки, дозирования и введения комплексной добавки заданной концентрации.

Для отделения песчаных частиц крупностью более 0,14 мм от пылевых фракций использован гидроциклонный классификатор песка. Вынос пылевой фракции песка осуществляется водным потоком в процессе промывки мелкозернистого песка. Вынос пылеватых частиц происходит в результате их сепарации под действием силы тяжести и различного сопротивления песчинок переменной granulometрии.

С помощью промывочной сепарации, как и в лабораторных опытах, достигнут вынос почти 50 % пылевых фракций песка. При этом наиболее легко удалились свободные и адсорбированные на поверхности песчаных зерен глинистые частицы. Микроскопический анализ промытого песка показал, что остающиеся в нем частицы крупностью около 0,14 мм представляют мелкозернистые фракции песка. Свойства промытых мелкозернистых песков, как показали проведенные опыты, мало отличаются от песков средней крупности. Улучшение свойств мелкозернистого заполнителя достигалось применением укрупнителей - каменных вывесок.

Дополнительным условием степени обогащения промытых мелкозернистых песков служили экономические соображения.

Исходя из них, масса укрупнителя могла составлять 23 % годового расхода мелкого песка. Каменные вывески получались как отход производства гравийно-щебеночного завода производительностью до 1 млн. т1 в год.

В соответствии с выполненными исследованиями, щебеночный завод оборудован классификатором мелких фракций для получения укрупнителя объемом до 120 тыс. м³ в год песчаных фракций. В результате применения промывки и сепарации песчаных фракций производительность завода по песку 2,5...5 мм составила до 20 тыс. м² в год. Этот объем укрупнителя обеспечивал годовое обогащение песка на основных БСУ стройиндустрии. Удорожание себестоимости фракционного песка составило в среднем 40 %.

Расход укрупнителя при производстве гидротехнического бетона составил в среднем 20 % от количества мелкозернистого песка. В качестве укрупнителя использовались вывески каменодробления крупностью 2,5...5 мм.

Смешивание мелкого песка и укрупнителя из-за отсутствия дополнительных разделительных стенок производилось на складе заполнителей. Несмотря на перемешивание компонентов мелкого заполнителя складским бульдозером, их однородность зачастую не достигалась. Однако, количественное соотношение мелкого песка и каменных вывесок практически соблюдалось.

Изучение смешивания компонентов мелкого заполнителя достигалось путем его подачи ленточными транспортерами, а также при приготовлении бетонной смеси. Как показывают данные, от введения укрупнителя модуль крепости песка повышался на 0,9... 1,2. Следовательно, происходил переход мелкого песка в разряд среднезернистого песка с модулем крупности 2,8. Качество промытого песка оставалось стабильным на протяжении всего срока строительства. К недостаткам получаемого песка относилось наличие на его поверхности частиц глинистых фракций. Последнее приводило к значительному снижению прочности бетона, а также к ухудшению его морозостойкости.

Вторым технологическим вопросом являлась организация приготовления, дозирования и введение в бетон комплексной добавки заданной концентрации. Для этого использовалась типовая схема приготовления и дозирования ПАВ на механизированных бетоносмесительных заводах. В стройиндустрии центральный бетоносмесительный цех был оборудован дополнительной установкой для высокоинтенсивного перемешивания компонентов комплексной добавки.

Эта установка представляет собой емкость приготовления для барботажа через раствор комплексной добавки сжатого воздуха. Высокоинтенсивный барботаж в течение 2-3 минут промежутков времени приводит к полному растворению ЛСТ и СНВ, а также к модификации их свойств.

Активацию комплексной добавки и модификацию ее свойств, по-видимому, можно объяснить образованием комплексом поверхностных веществ различной природы. Для улучшения смешивания компонентов комплексной добавки в емкости барботажа со сжатым воздухом осуществлялась при помощи двух противоположно направленных штуцеров по касательной стенке емкости.