

УДК 621.452

СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВДУВА ГЕЛИЯ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС В КАМЕРЕ ЖРД С ВЫТЕСНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

© 2011 В. Н. Шнякин, А. Н. Коваленко, В. Н. Коваленко, А. В. Родькин,
Е. Н. Бочев, А. П. Макотер, Ю. В. Блишун

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина

Для эффективного анализа результатов стендовых и летных испытаний ЖРД с вытеснительной системой подачи топлива необходимо иметь методику оценки движения газожидкостной смеси по магистралям двигателя. С этой целью подвергались анализу статические и динамические давления, величины виброускорений в характерных точках магистралей при проливах водой на специальной экспериментальной установке. В качестве «эталонного» метода использованы наблюдения при помощи высокоскоростной видеокамеры.

Вдув гелия, газожидкостная смесь, испытания ЖРД.

Наличие свободного гелия в компонентах топлива на входе в ЖРД оказывает существенное влияние на его рабочие характеристики. Для ЖРД с вытеснительной системой подачи топлива присутствие в топливных баках свободного газа наддува является допустимым явлением. До воспламенения в камере тяги нет, поэтому в период запуска двигателя (от момента открытия подбаковых клапанов до воспламенения) свободный газ может проникнуть в топливные магистрали в виде большого одиночного пузыря или серии более мелких пузырей. Продолжительность такого состояния составляет $\approx 0,5 \dots 1$ с. Свободный газ может проникнуть в огневое пространство камеры и при останове, например при выработке компонента в одном из баков и разрушении мембраны, либо при использовании баков без разделительной мембраны. Наличие свободного газа в компонентах топлива приводит к возникновению двухфазного газожидкостного потока и изменению гидравлических характеристик системы и рабочих процессов.

Для проведения исследований влияния свободного гелия в топливе на рабочие характеристики ЖРД необходимо разработать и изготовить экспериментальную установку для создания методики оценки движения свободного газа по топливным магистралям двигателя. Методика должна быть основана на анализе результатов измерений датчиками, которые широко применяются при огневых испытаниях ЖРД, что позволит использовать данную методику при стендовых и

летных испытаниях ЖРД. С этой целью была разработана экспериментальная установка (рис. 1), в которой статические давления замерялись датчиками типа МД и АИР, пульсации давления – датчиками ЛХ611, а вибрации – акселерометрами типа АВС-134-02. Установка позволяет различным образом осуществлять вдув свободного газа: с разрывом и без разрыва потока жидкости, при запуске или на установившемся режиме. В качестве свободного газа использовался натуральный газ – гелий, модельная жидкость – вода. Применение воды позволило существенно упростить обработку методики, кроме того, появилась возможность ввести в состав экспериментальной установки устройство с прозрачным участком магистрали и применить при исследовании в качестве «эталонного» метода видеонаблюдение при помощи высокоскоростной видеокамеры. Опираясь на показания видеонаблюдений, проверялись другие методы оценки, основанные на анализе показаний датчиков статических и динамических давлений и вибраций.

При испытаниях исследовался вдув гелия объемом от 600 нсм^3 до 5000 нсм^3 в поток воды с расходом $0,35 \text{ л/с}$ и скоростью 4 м/с . Время вдува составляло от $0,67 \text{ с}$ до 1 с . Видеонаблюдения показали, что скорость движения пузырей практически равна скорости жидкости. Визуально различия в характере и скорости движения пузырей для горизонтально и вертикально расположенных трубопроводов не выявлено.

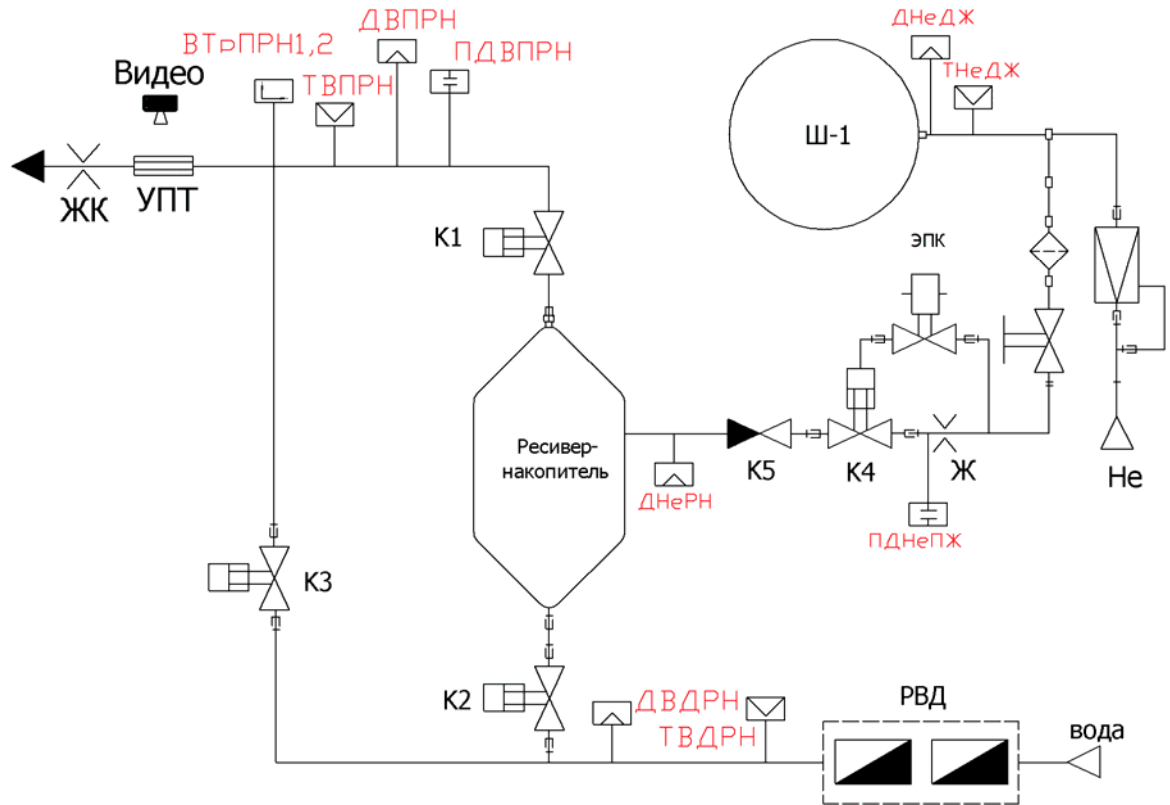


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

В процессе движения гелиевого пузыря в гидравлических магистралях происходит его разрушение-дробление в турбулентном потоке жидкости. Наличие в трактах сложных гидравлических сопротивлений, таких как клапаны, фильтры, гофрированные металлорукава и другие внезапные сужения-расширения потока, охлаждающие каналы камеры, способствует процессам разрушения-дробления пузыря.

Видеонаблюдения показали, что газовый пузырь при прохождении участка магистрали длиной $\approx 0,62$ м существенно меняет свою начальную конфигурацию, а продолжительность прохождения гелиевых пузырей значительно превышает расчетные значения. При этом можно разделить получившуюся газожидкостную смесь на два участка. Первый участок – сильно концентрированная газожидкостная смесь (практически цельный пузырь), второй – слабо концентрированная газожидкостная смесь, представляющая собой поток отдельных пузырей («хвост» пузыря). Критерий разделения газожидкостной смеси на пузырь и «хвост» условный – как

только смесь начинает представлять собой совокупность отдельных, отчетливо различаемых визуально пузырьков, то это и есть «хвост». Характер течения газожидкостной смеси для объема гелия $(600 \dots 800) \text{ нсм}^3$ пузырьковый. При увеличении объема до 2500 нсм^3 и выше характер течения несколько изменяется: в начальный период наблюдается дисперсно-кольцевой характер, а для «хвоста» остается пузырьковый (рис. 2). Объемное газосодержание в «хвосте» пузыря, рассчитанное по результатам расшифровки видеозаписи, составляет до 1%, среднее объемное газосодержание при прохождении основного пузыря составляет от 25% до 50%.

Наряду с видеонаблюдением проводился анализ статических давлений, пульсаций давлений и вибраций трубопровода при прохождении газовых пузырей, анализ замеренных параметров показал, что временной участок прохождения гелия вблизи соответствующих датчиков можно также разделить на два характерных участка: сильно концентрированная и слабо концентрированная газожидкостная смесь.

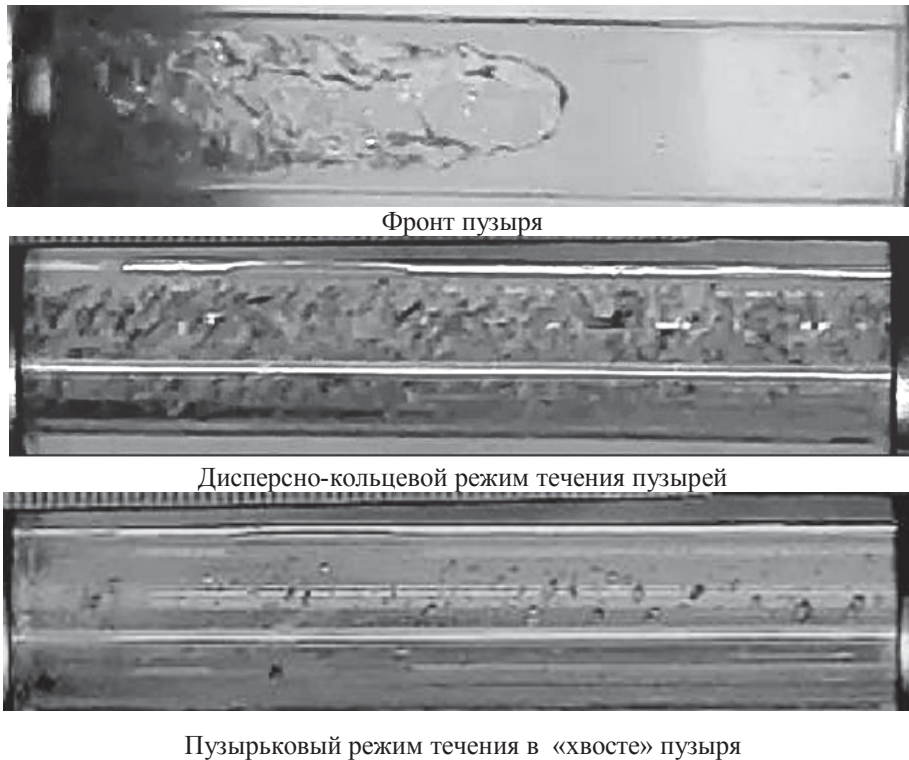


Рис. 2. Режимы течения при вдуве 2500 нсм^3 гелия

Анализ статических давлений проводился для различных участков магистрали по величине коэффициента гидравлического сопротивления, отнесенного к входному расходу воды. Графики изменения коэффициен-

та гидравлического сопротивления для различных видов испытаний приведены на рис. 3 и 4.

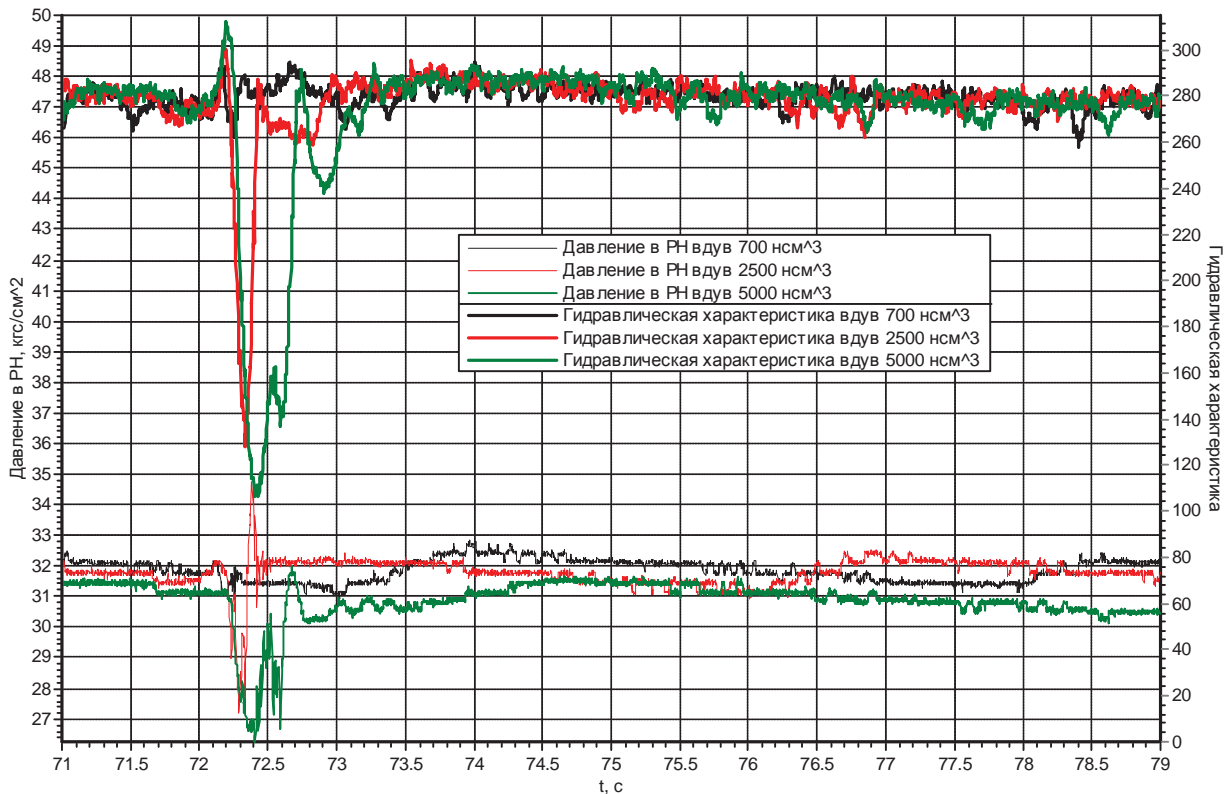


Рис. 3. Изменение гидравлического коэффициента при вдуве гелия с разрывом потока на режиме

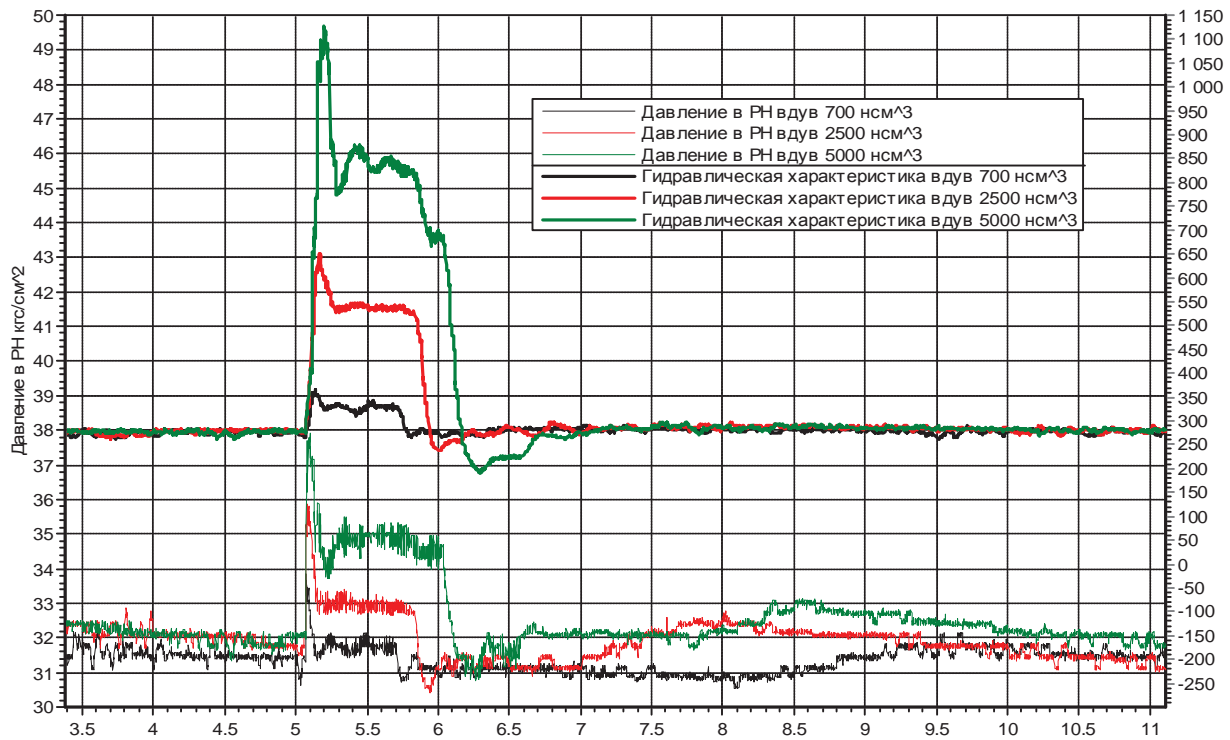


Рис. 4. Изменение гидравлического коэффициента при вдуве гелия без разрыва потока на режиме

Анализ этих зависимостей показывает, что наличие пузырей гелия в потоке воды приводит к заметному изменению величины коэффициента гидравлического сопротивления магистралей. Однако зависимость гидравлического коэффициента на участке вдува показывает только качественную картину течения, количественная оценка объема вдуваемого гелия и времени прохождения газожидкостной смеси через контрольные точки затруднена и имеет высокую погрешность определения. Возможно, что характер поведения статических давлений топливных магистралей обусловлен в основном особенностями, связанными с режимом истечения газожидкостной смеси переменной концентрации через сосредоточенное сопротивление (жиклер ЖК), имитирующее в составе экспериментальной установки гидравлическое сопротивление двигателя.

Анализ результатов измерений и обработки пульсаций давления показал, что появление большого количества газа в потоке жидкости, в зоне чувствительного элемента датчика приводит к значительному уменьшению амплитуды сигнала по всем спектральным составляющим, вплоть до полного его исчезновения (рис. 5). После прохождения пузыря вновь появляется сигнал от датчика. Амплитудно-частотный спектр его через определенный промежуток времени вос-

станавливается до прежних значений как по амплитуде, так и по частоте. Промежуток времени между исчезновением (уменьшением) сигнала и полным его восстановлением соответствует длительности существования газовых пузырей в потоке жидкости в месте установки датчика.

«Хвост» пузыря вначале представляет собой газожидкостную смесь с достаточно крупными пузырьками газа, естественный процесс дробления которых вызывает резкое увеличение амплитуд в спектре сигнала в области частот 100÷350 Гц. Далее пузырьки газа постепенно уменьшаются в размере, количество их увеличивается и спектр частот уходит в высокочастотную область.

Исследования проводились на двух экспериментальных установках, которые различались ориентацией замерного коллектора и прозрачного участка магистрали. При горизонтальном расположении - датчик пульсации давления был расположен сверху над замерным коллектором, при этом чувствительный элемент датчика контактировал с газовой подушкой в небольшой непроточной полости. При вертикальном расположении датчик пульсаций давления был расположен сбоку трубопровода, в этом случае чувствительный элемент датчика контактировал с газожидкостной смесью по-разному, в зависимости от содержания гелия в ней.

При горизонтальном расположении замерного коллектора с датчиком пульсации давления, расположенным сверху, зарегист-

рированный сигнал нагляднее описывает характер прохождения газожидкостной смеси.

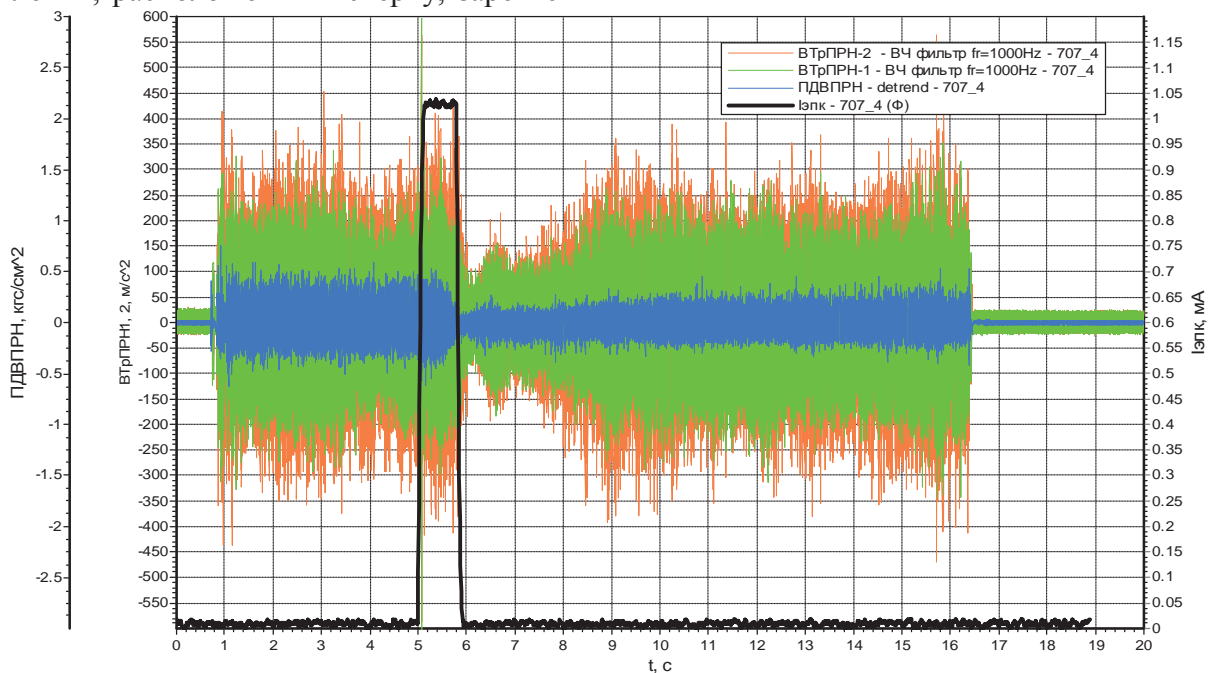


Рис. 5. Суммарные сигналы пульсаций давления жидкости (ПДВПРН) и виброперегрузок трубопровода (ВТрПРН-1, 2), и команда на вдув гелия в тракт ($I_{элк}$). Объем вдуваемого гелия 2500 нсм^3

Суммарный сигнал датчиков вибраций в радиальном и осевом направлении, установленных в замерном коллекторе, позволяет приблизительно определить временной промежуток при прохождении пузыря и в некоторых случаях качественно «хвост» пузыря. Ориентация замерного коллектора (горизонтальное или вертикальное положение), жесткость закрепления трубопроводов

к силовой конструкции оказывает существенное влияние на величину и характер замеренных вибраций (рис. 6). Кроме того, на величину вибраций существенное влияние оказывает процесс прохождения газожидкостной смеси через сосредоточенное гидравлическое сопротивление (жиклер ЖК, см. рис. 1), установленное за прозрачной трубкой.

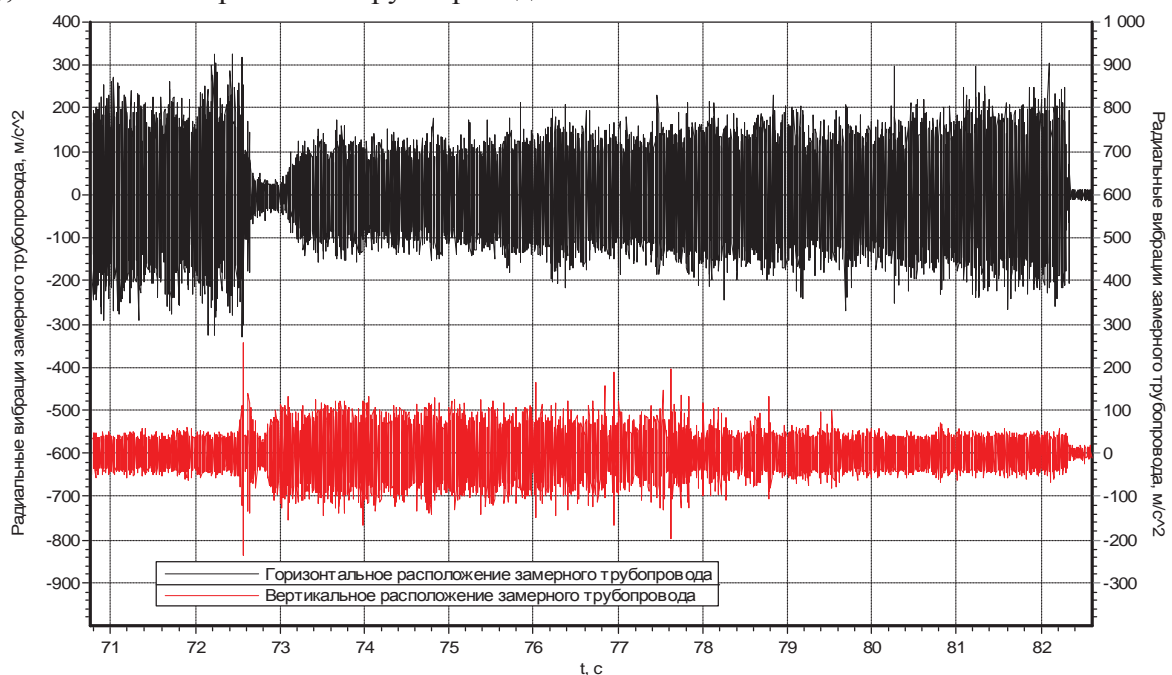


Рис. 6. Влияние ориентации замерного коллектора на характер вибраций

Измерения вибраций проводились в том же диапазоне частот (от 1 Гц до 20 кГц), что и для пульсаций давления жидкости внутри коллектора. Характер изменения суммарных сигналов, измеренных виброакселерометрами на поверхности замерного коллектора и датчиками пульсаций давления жидкости внутри коллектора, в первом приближении идентичен. Однако амплитудно-частотные спектры обоих, в общем-то разных физических процессов, имеют между собой и определенные различия. Так, пульсации давления жидкости внутри коллектора имеют спектры сигналов с преобладающими амплитудами в диапазоне частот от десятков Гц до 5-7 кГц. А вибрации коллектора наиболее сильно проявляются в диапазоне частот от 5 кГц и выше. Кроме того, из-за низких амплитуд вибраций в месте установки виброакселерометров и недостаточной для этих измерений чувствительностью виброакселерометров, трудно получить приемлемое отношение сигнал/шум. По этой причине, при измерении вибраций в спектре зарегистрированных сигналов на частотах вплоть до 3-4 кГц преобладают в основном шумы, что значительно затрудняет анализ. Ввиду того, что измерения, полученные датчиками пульсаций давления, наиболее полно отражают физические процессы, происходящие в коллекторе при движении жидкости, они были взяты как основные для последующего анализа. Измерения вибраций, как не имеющие в основе своей отображение физического состояния среды внутри трубопровода, принимались факультативными для получения дополнительной информации.

Для интерпретации результатов измерений пульсаций давлений и вибраций использованы видеозаписи течения двухфазного потока в прозрачном участке магист-

рали, расположенном вблизи замерного коллектора. Видеонаблюдение позволило четко определить время прохождения газа через прозрачный участок и оценить его объем. Сопоставление этих данных с результатами спектрального анализа пульсаций давления и вибраций позволило установить связь между изменениями спектрального состава пульсаций давления и фазами движения жидкости с газом, описанными выше.

Анализ сигналов показал, что прохождение газовых включений или газожидкостной смеси мимо датчиков приводит к существенным изменениям их спектров.

На рис. 7 и 8 приведены трехмерные спектрограммы пульсаций давления жидкости и виброперегрузок замерного коллектора, на которых отчетливо виден момент прохождения газового пузыря или смеси воды с газовыми пузырями через замерный коллектор, где установлены рассматриваемые датчики. Наиболее информативными оказались пульсации давления, по спектрограммам которых видны все стадии прохождения газа через замерный коллектор.

Объем гелия определялся следующим образом. Перед началом проливочных испытаний была проведена калибровка системы вдува, на основании которой получены зависимости вдутого объема гелия от входного давления гелия, от величины противодействия, а также от временных характеристик клапанов системы вдува гелия. На основании этих зависимостей для каждого испытания определялся суммарный объем гелия, вдутого в тракт экспериментальной установки. Затем, так как «хвост» пузыря определялся как совокупность отдельных, отчетливо расположенных пузырей, производился расчет объема гелия ручным способом по видеозаписям.

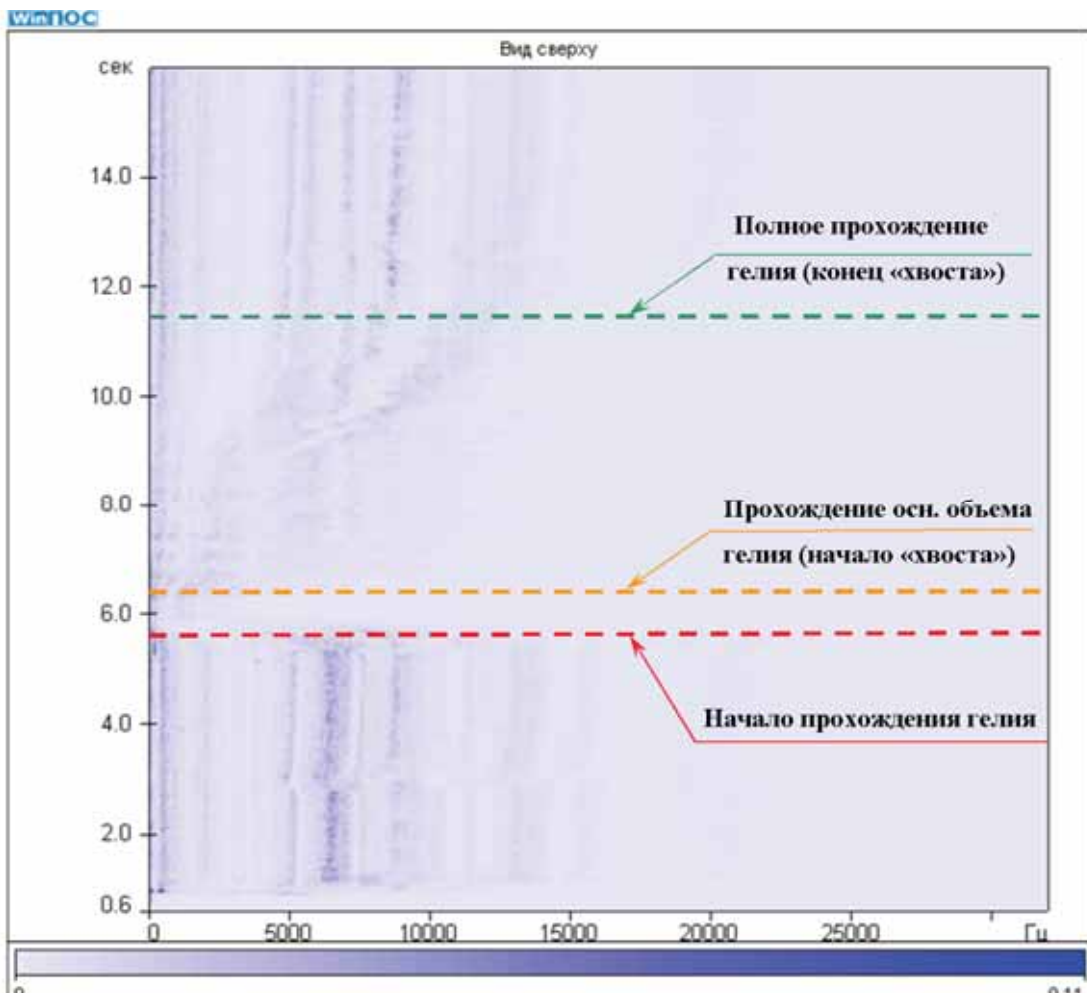
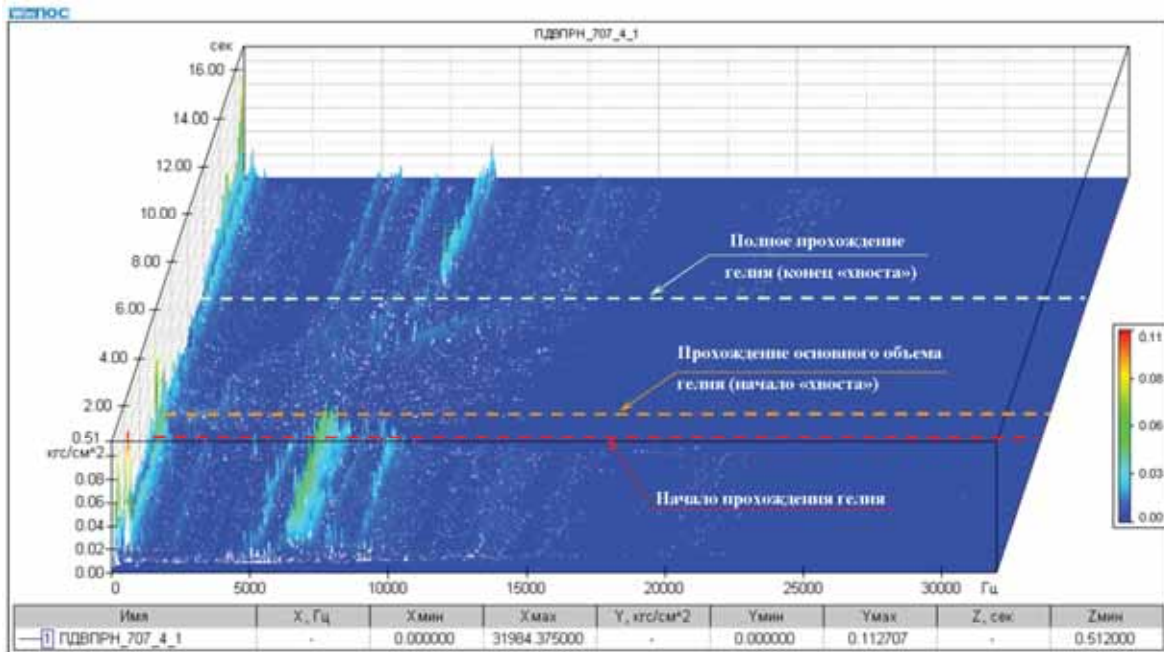


Рис. 7. Трехмерная спектрограмма пульсации давления воды в момент прохождения пузырей гелия. Испытание без разрыва потока, объем вдуваемого гелия 2500 нсм³

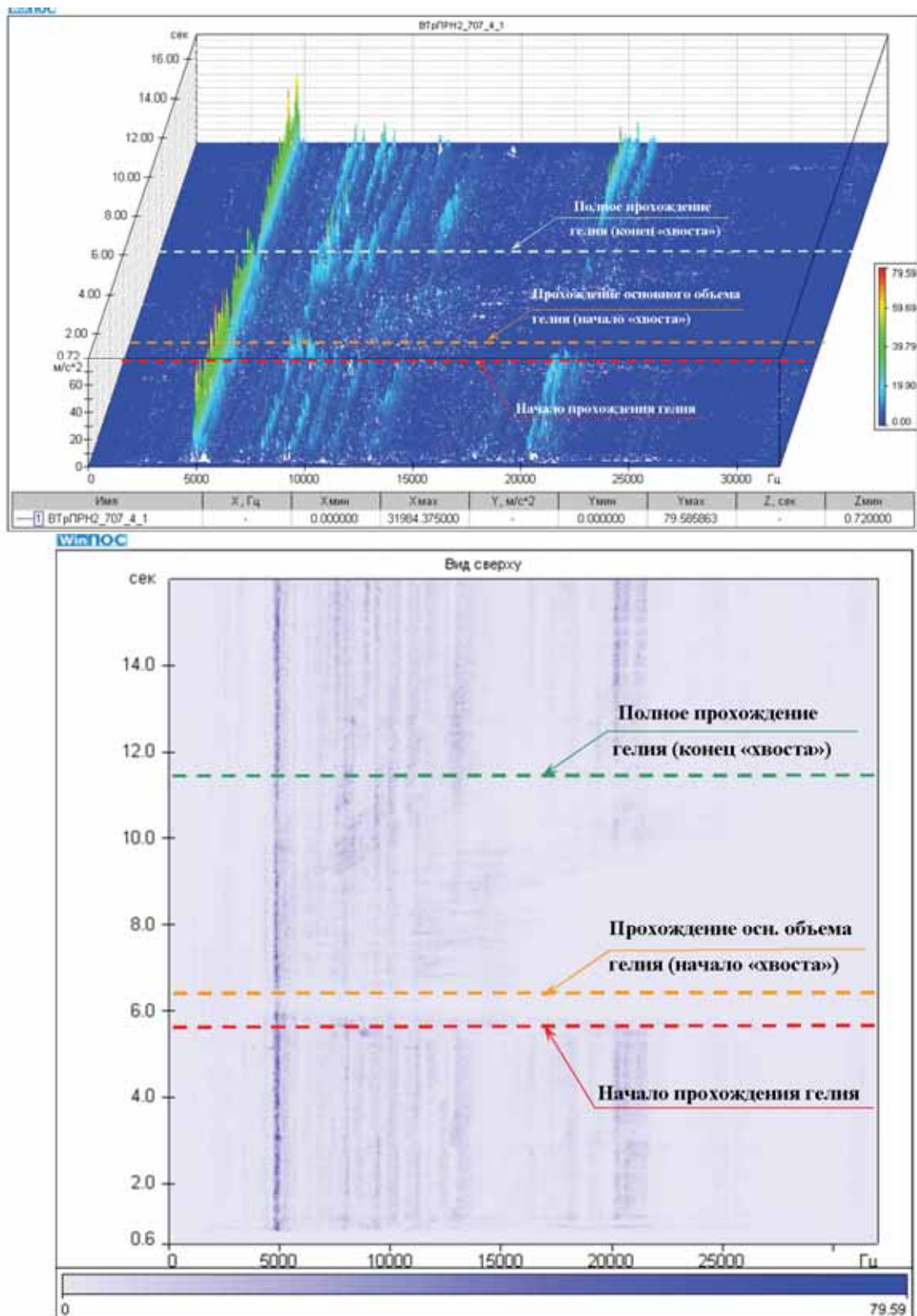


Рис. 8. Трехмерная спектрограмма вибраций трубопровода в момент прохождения пузырей гелия. Испытание без разрыва потока, объем вдуваемого гелия 2500 нсм³

Наилучшее соответствие результатам видеонаблюдений, принятым как «эталонный» метод, показал метод обработки показаний датчиков пульсаций давлений. Наблюдаемое некоторое опережение начала движения пузырей гелия, определенное

этим методом относительно видеонаблюдений, вызвано местом расположения датчиков ЛХ611 относительно места визуального наблюдения. От датчика пульсаций газожидкостный поток движется до прозрачного участка трубопровода 0,15 с. Анализ вре-

менных характеристик прохождения гелиевого пузыря по магистралям экспериментальных установок, выполненный различными способами, показывает некоторое несоответствие продолжительности участков цельного пузыря и «хвоста». Это допустимо, потому что критерии для разделения потока газожидкостной смеси на «пузырь» и «хвост» при оценке видеонаблюдений, вибраций, статических давлений (гидравличе-

ский коэффициент) и пульсаций давления выбраны независимо друг от друга (рис 9). При этом, конечно же, концентрация гелия в потоке газожидкостной эмульсии на условной границе «пузыря» и «хвоста» при оценке видеоматериалов, вибраций, пульсаций и статических давлений будет различной, соответственно и временные характеристики будут несколько различными.

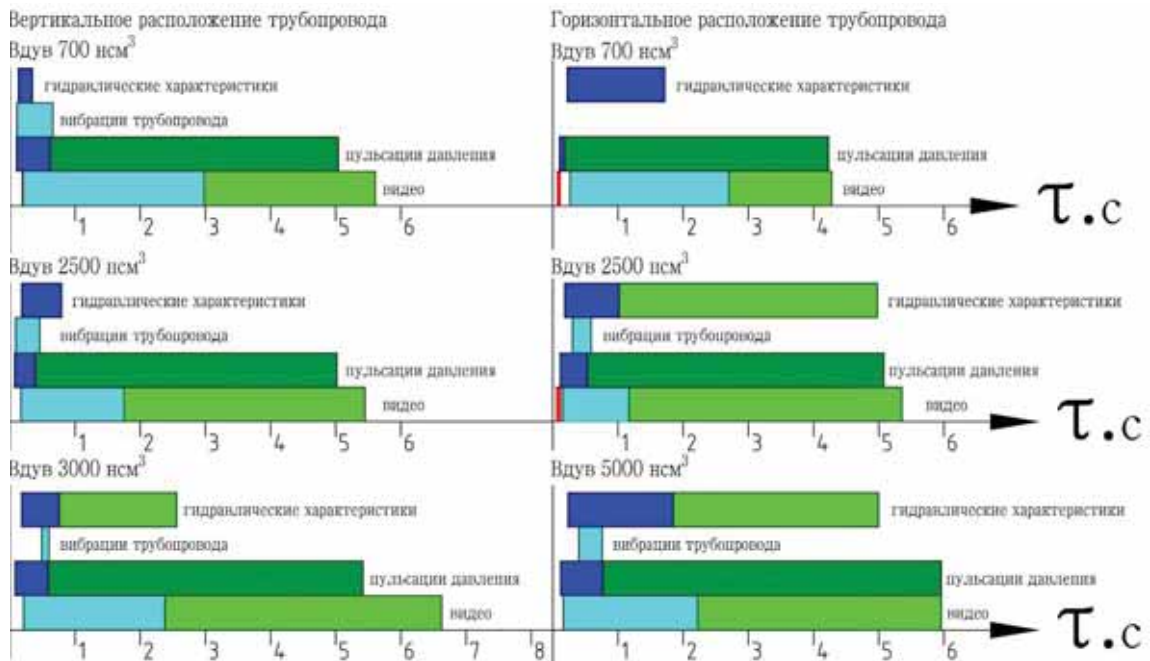


Рис. 9. Гистограммы времен прохождения гелия

Анализ пульсаций давлений в жидкостном тракте оказался самым информативным для определения временных характеристик прохождения газожидкостной смеси. Полученная общая картина зависит от многих факторов, например, ориентации замерного коллектора, наличия газовой подушки на чувствительном элементе датчика пульсаций и др. Однако всегда при анализе можно выделить характерные особенности амплитудно-частотных характеристик, которые позволят определить временной участок прохождения пузыря и «хвоста». Результаты анализа пульсаций давления могут быть использованы при проведении огневых испытаний. Недостатком предложенного анализа пульсаций является трудность определения

количественных характеристик, например объемного газосодержания газожидкостной смеси переменной концентрации. Однако разработанная методика позволяет однозначно выявить появление в жидкостных трактах двухфазных потоков и определить режимы течения газожидкостных смесей.

Разработанная методика была опробована при проведении огневых испытаний ЖРД тягой 250 кг. С помощью обработанных замеров пульсаций давления и вибраций трубопроводов, установленных в различных точках топливных магистралей, было подтверждено наличие вынужденного двухфазного потока и объяснены особенности рабочих процессов в камере ЖРД при наличии в одном из компонентов топлива гелия.

CREATION OF THE TECHNIQUE OF HE DELIVERY INFLUENCE ON WORKING PROCESS IN THE LRE CHAMBER WITH EXPULSION PROPELLANT SUPPLY

© 2011 V. N. Shnyakin, A. N. Kovalenko, V. N. Kovalenko, A. V. Rod'kin,
E. N. Bochev, A. P. Makoter, Yu. V. Blishun

Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk, Ukraine

For the effective analysis of the LRE with expulsion propellant supply bench and flight tests results, the gas-liquid mixture flow in engine pipelines estimation technique should be used. For this purpose, static and dynamic pressures, vibration accelerations in distinguished points of pipelines at water flow tests on special experimental installation have been analyzed. Observations by a high-speed videocamera were used as a "reference" method.

Helium injection, gas-liquid mixture, LRE tests.

Информация об авторах

Шнякин Владимир Николаевич, кандидат технических наук, Главный конструктор ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Коваленко Андрей Николаевич, начальник отдела ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Коваленко Виктор Николаевич, начальник отдела ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Родькин Андрей Владимирович, начальник группы ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Бочев Евгений Николаевич, инженер ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Макотер Александр Петрович, ведущий инженер ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Блишун Юрий Вячеславович, инженер ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск. E-mail: info@yuzhnoye.com. Область научных интересов: разработка ЖРД.

Shnyakin Vladimir Nikolaevich, candidate of engineering sciences, DO chief designer of Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Kovalenko Andrey Nikolaevich, head of department of Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Kovalenko Viktor Nikolaevich, head of department of Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Rod'kin Andrey Vladimirovich, head of group of Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Makoter Alexandr Petrovich, lead engineer of Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Bochev Evgeniy Nikolaevich, engineer of Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.

Blishun Yuriy Vyatcheslavovich, engineer of Yuzhnoye state design office, Dnepropetrovsk. E-mail: info@yuzhnoye.com. Area of research: LRE development.