

А. П. Пожитков, Ю. К. Шлык

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ
«ТРУБОПРОВОД — ПЕРЕКАЧИВАЮЩАЯ СТАНЦИЯ»
НА РЕЖИМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ
В ТРУБОПРОВОДЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Представлены результаты экспериментальных исследований режима движения воды в трубопроводе, в ходе которых было установлено влияние сужения проходного сечения трубопровода на амплитудно-частотные характеристики гидроакустических шумов, возникающих при движении жидкости в трубе.

По результатам ранее выполненных теоретических исследований [1, 2] было доказано, что, используя метод динамических аналогий [3], можно представить магистральный нефтепровод в виде электрической линии с распределенными параметрами, как волноводную систему, способную нести информацию о многих гидродинамических параметрах движения среды (нефть, нефтепродукты и т. д.) в трубопроводе. С позиции классической акустики [4] сам факт турбулентного движения среды уже предполагает возникновение некоторого акустического поля, представленного спектром гидродинамических шумов широкого частотного диапазона. С позиции системного анализа информационного содержания состава спектра следует отметить, что на него оказывает влияние не только собственно режим движения среды, выбранный исходя из заданного технологического режима ее перекачки, но и такие параметры собственно волноводной системы, как возможное сужение внутреннего сечения трубопровода, вызванное, например, отложениями парафина, присутствием в составе трубопроводной системы различного рода запорных и дросселирующих устройств, предназначенных для регулировки расхода, а также изменения физического состава самой среды, возможности появления негерметичности [5], что было показано применительно к перекачке газа, и главное — насосный агрегат. Исходя из принципа работы перекачивающей станции, где в качестве источника энергии используется центробежный насос с приводом синхронного двигателя [6, 7], важно отметить, что состав спектра шумов будет обогащен именно теми группами частот, которые непосредственно связаны как с частотой вращения (оборотами) вала, так и с количеством лопастей его рабочего колеса. Любые изменения технического состояния в первую очередь лопастей неизбежно приведут к изменению частотного состава именно той группы частот, о которой было сказано выше. Все это позволяет рассматривать перекачивающую станцию в качестве широкополосного источника гидродинамических шумов, вводимых в волноводную систему линейной части магистрального нефтепровода.

С целью экспериментального подтверждения выдвинутых теоретических положений был разработан специальный лабораторный стенд, качественно реализующий в себе все основные элементы трубопроводной системы. Он содержит два основных блока: технический, включающий в себя собственно трубопровод с подсоединенным к нему центробежным насосом и запорной арматурой, и измерительный, позволяющий регистрировать частотный состав спектра шумов, возникающих в процессе работы комплекса в целом. Принципиальная схема измерительного комплекса представлена на рис. 1.

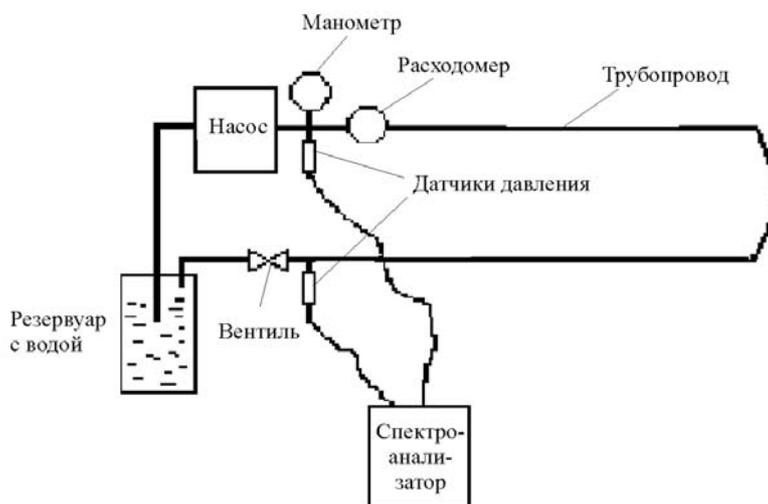


Рис. 1. Принципиальная блочная схема измерительного комплекса

Стенд имеет следующие технические и измерительные характеристики.

Технический блок:

- полипропиленовый трубопровод длиной 40 м с наружным и внутренним диаметрами 15 и 12 мм соответственно;
- центробежный насос БЦ-0,5-20 «КАМА-10» с номинальными значениями расхода $1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напора 20 м, привод осуществляется от однофазного коллекторного двигателя переменного тока;
- соединительная и запорная арматура трубопровода (задвижки);
- резервуар с технической водой, необходимый для реализации замкнутого цикла движения жидкости в условиях эксперимента.

Измерительный блок:

- анализатор спектра частот А17 с диапазоном измеряемых частот от 0,03 Гц до 200 кГц, оснащенный пакетом прикладных программ, позволяющих осуществлять компьютерную обработку регистрируемых спектральных характеристик;
- счетчик жидкости «Minol International GmbH & Co. KG», Германия;
- манометр с пределом измерения $6 \times 10^5 \text{ Па}$;
- первичные преобразователи давления (датчики) тензометрического типа КРТ 5 с верхним пределом измерения $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$;
- источники постоянного напряжения для питания датчиков;
- линии связи.

Эксперимент включает следующие основные этапы.

1. Исследование частотного состава спектра, задаваемого работой центробежного насоса при различных режимах его загрузки.
2. Регистрация и анализ спектра гидродинамических шумов, возникающих при различных режимах движения воды в трубопроводе.

В качестве основного регулирующего фактора на обоих этапах исследования было выбрано изменение проходного сечения трубопровода с помощью задвижки.

В ходе первого этапа эксперимента по мере ступенчатого закрытия задвижки регистрировались следующие параметры: давление в линии нагнетания и расход жидкости в трубопроводе. Параллельно с этим проводилась регистрация спектра гидроакустических шумов в линии нагнетания в низкочастотной области (до 1 кГц). Так как используемый в электроприводе центробежного насоса коллекторный однофазный двигатель имеет «мягкую» моментную характеристику [7], по мере закрытия задвижки его обороты возрастали. Это вполне обоснованно: с уменьшением расхода нагрузка на валу электродвигателя уменьшалась, т. е. его режим работы приближался к режиму холостого хода. В соответствии с паспортными данными номинальные обороты вала составляют примерно 5000 об./мин, поэтому основная несущая частота будет находиться в диапазоне 90 Гц. Однако, в связи с тем, что рабочее колесо насоса имеет шесть лопастей, в составе спектра акустических шумов, генерируемых насосом, появляется еще одна составляющая группы частот, в 6 раз больше по значению. Это своего рода несущая частота, которая вводится в волноводную систему магистрального трубопровода.

На рис. 2 приводятся экспериментальные зависимости изменения расхода (Q) и давления (P) в линии нагнетания по мере процентного закрытия задвижки.

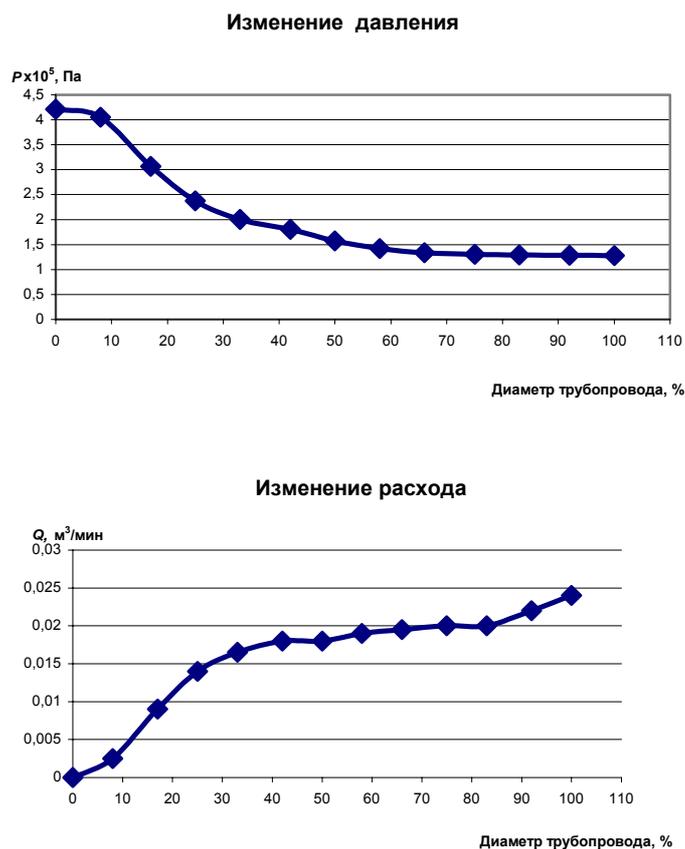


Рис. 2. Изменение давления и расхода по мере закрытия задвижки

Для этих же экспериментальных точек проводилась регистрация спектров шумов в диапазоне 600–700 Гц. Из всего многообразия зарегистрированных в ходе эксперимента спектров на рис. 3 представлены три наиболее характерных фрагмента спектров, соответствующих: а — полностью открытой, б — закрытой на 50 %, в — полностью закрытой задвижке.



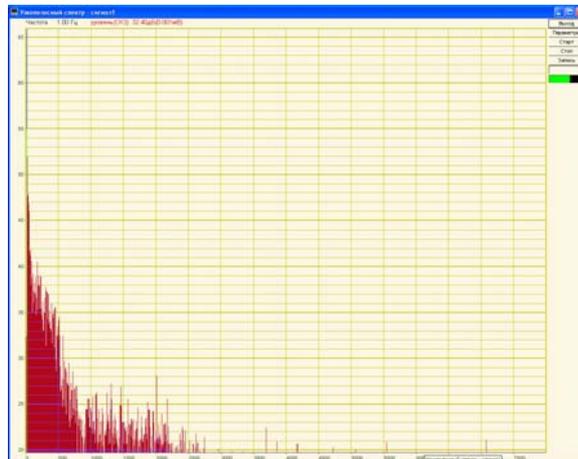
Рис. 3. Изменение несущей частоты спектра по мере закрытия задвижки

Из рис. 3 очевидно, что это изменение может быть объяснено лишь вариациями частоты вращения вала центробежного насоса. В ходе данного эксперимента регистрирующий датчик давления располагался непосредственно на выходе насоса, что позволило оценить зарегистрированные изменения спектра с максимальной степенью достоверности, исключив при этом влияние паразитных шумов, которые могут иметь другую природу происхождения. Важность полученного результата состоит в том, что в условиях эксперимента

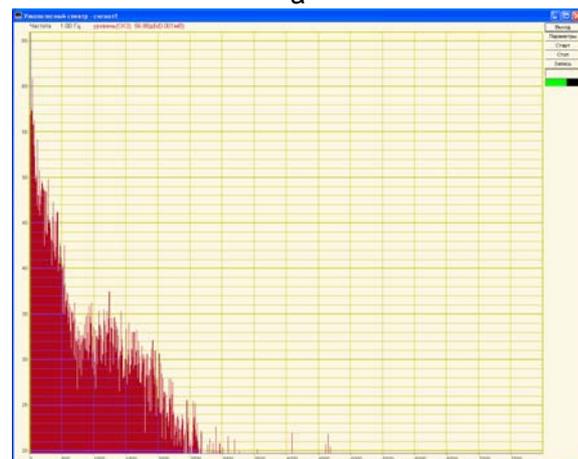
было однозначно доказано, что по изменению спектра несущей частоты насоса можно контролировать режим работы насоса и возможное отклонение технического состояния лопастей рабочего колеса, вызванное, например, износом поверхности, профиля лопастей и т. д. Последнее обстоятельство приобретает особую значимость в реальных условиях перекачки нефти, поскольку на перекачивающих станциях используются насосы с синхронным приводом, отличительной особенностью которого является неизменность частоты вращения, поэтому любые изменения спектра будут оперативно свидетельствовать о возможных нарушениях технического состояния насоса в целом.

На втором этапе исследования была предпринята попытка оценить степень изменения спектра гидроакустических шумов от режима движения (расхода) воды в трубопроводе. С использованием того же методологического подхода, а именно процентного дросселирования потока за счет изменения расхода жидкости в трубопроводе, оценивался качественно вид спектра в целом. Регистрация информации осуществлялась в месте установленной задвижки.

На рис. 4 представлены наиболее показательные, на наш взгляд, виды спектров, соответствующие различным режимам движения воды в трубопроводе.

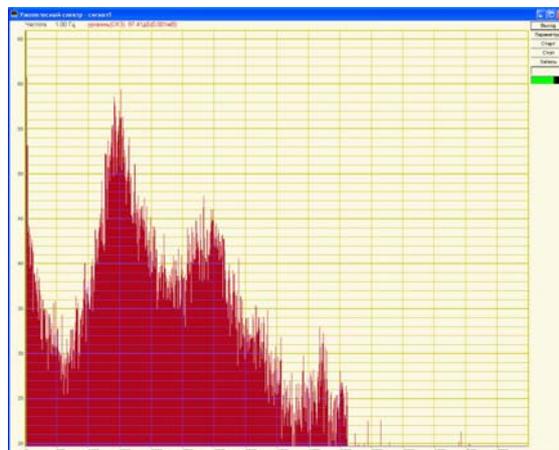


а

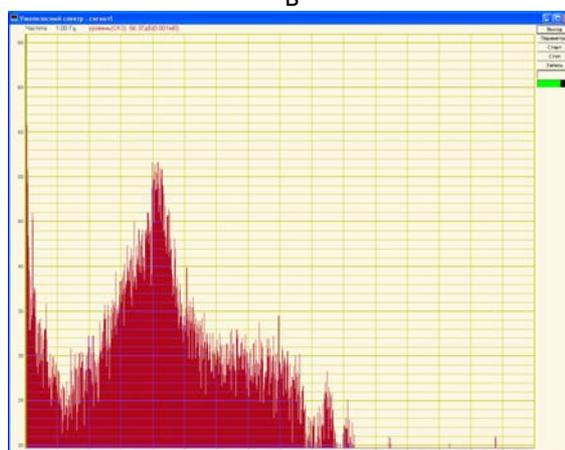


б

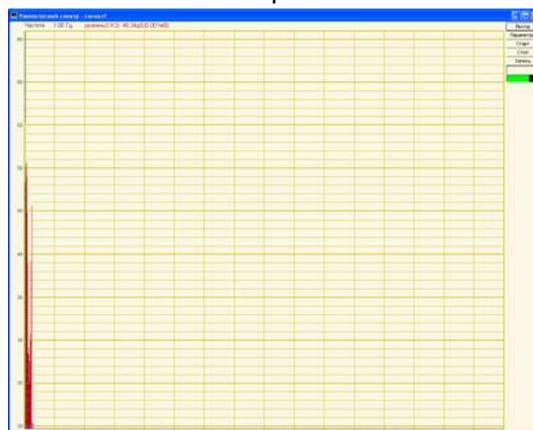
Рис. 4. Спектры гидроакустических шумов при степени закрытия задвижки:
а — 0 %; б — 33 %



В



Г



Д

Рис. 4 (окончание). Спектры гидроакустических шумов при степени закрытия задвижки: в — 83 %; г — 91 %; д — 100 %

На основе данных амплитудно-частотных характеристик, соответствующих тем или иным режимам движения воды в трубопроводе, вариации расхода могут быть оперативно (с запаздыванием менее 0,3 с) оценены по изменению качественного состава регистрируемых спектров вышеуказанных шумов.

Исходя из сказанного, очевидно, что по внешнему виду общего спектра частот можно идентифицировать то или иное значение расхода среды, в отличие от значительно усредненных показателей, регистрируемых стандартными расходомерами, имеющими высокую погрешность измерений.

Полученные в ходе экспериментов результаты позволяют наметить дальнейшие пути исследования:

1. Оценка возможности появления локальной неоднородности внутри трубопровода по изменению спектра гидроакустических шумов.

2. Оценка возможности изменения физических параметров среды по изменению характера переходного процесса, что предполагает использование в качестве носителей среды различных плотностей.

3. Определение характера спектра, соответствующего технологически заданному режиму движения, и его мониторинг в процессе эксплуатации трубопровода по всем рассмотренным выше позициям с целью идентификации того или иного отклонения режима перекачки от номинального.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлык Ю. К., Васильев Д. А., Пожитков А. П. Электродинамическое моделирование волнового процесса в магистральном трубопроводе // Вестн. кибернетики. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2004. — № 3. — С. 117–120.

2. Шлык Ю. К., Пожитков А. П., Кречина Г. С. Электродинамическое моделирование перекачивающей станции как объекта системы трубопроводного транспорта // Вестн. кибернетики. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2005. — № 4. — С. 24–28.

3. Ольсон Г. Динамические аналогии. — М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1947. — 224 с.

4. Рэлей. Теория звука: В 2 т. — М.: Гостехиздат, 1955.

5. Способ диагностики трубопровода: Пат. 2241174 РФ: 7F 17D 5/05 / Ю. К. Шлык, И. А. Каменских. — Опубл. 27.11.04, Бюл. № 33.

6. Галеев В. Б., Карпачев М. З., Харламенко В. И. Магистральные нефтепродуктопроводы. — 2-е изд. — М.: Недра, 1988. — 296 с.

7. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. — М.; Л.: Энергия, 1965. — 704 с.

A. P. Pozhytkov, Yu. K. Shlyk

ANALYSING THE INFLUENCE OF THE SYSTEM «PIPELINE — PUMPING STATION» PARAMETERS ON THE REGIME OF THE AGENT HYDRODYNAMIC FLOW INSIDE THE PIPELINE. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

The article introduces the results of experimental investigations of water flow regime inside the pipeline. There was determined the influence of narrowing pipeline flow area on amplitude-frequency response of sonar noises arising at liquid flow inside the pipe.