

РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВХОДЕ В НАСОСНЫЕ АГРЕГАТЫ МОЩНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

© 2002 В. П. Шорин, О. А. Журавлев, А. В. Ивченко, С. Ю. Комаров,
А. Н. Крючков, Ю. Д. Щеглов

Институт акустики машин
при Самарском государственном аэрокосмическом университете

Рассмотрены вопросы создания диагностической системы на основе метода лазерного «ножа» для изучения кавитационных процессов на входе в шнеко-центробежный насос авиационной энергоустановки. Дано описание разработанной экспериментальной системы и приведены полученные изображения кавитационных структур. На основании анализа структурных образований дается заключение об эффективности проводимых конструкторских доработок входного канала насоса.

При работе топливных и пневмогидравлических систем летательных аппаратов и двигателей нередко возникают повышенные колебания давления в магистралях, вибрации агрегатов и трубопроводов. Реализующиеся при этом виброакустические нагрузки приводят к прочностным и усталостным поломкам трубопроводной арматуры, разгерметизации соединений, вызывают нестабильную работу контуров регулирования. Одним из основных источников виброакустического воздействия в трубопроводных системах летательных аппаратов и двигателей является неравномерная подача топливных и гидравлических насосов объемного типа (шестеренных и плунжерных). Неравномерная подача таких насосов связана с дискретностью зацепления зубьев шестерен или подключения полостей плунжеров к магистралям всасывания и нагнетания. Колебания рабочих сред, возбуждаемые качающими узлами насосов, имеют широкий частотный диапазон и при совпадении с собственными частотами магистралей многократно усиливаются, приводя к вибрациям агрегатов и трубопроводов, снижению надежности систем. Другой важной особенностью виброакустических процессов, характерной для топливных систем, является то, что интенсивные пульсации давления, возбуждаемые основными насосами, приходят в низконапорные топливные магистрали, во-первых, вследствие возбуждения колебаний насосами в линиях всасывания и,

во-вторых, из напорных магистралей по перепускным и сливным линиям. Колебания давления, взаимодействуя в низконапорных магистралях с кавитационными процессами, сопровождающими работу подкачивающих центробежных и шнековых насосов, приводят к интенсивным нагрузкам на узлы этих насосов, зачастую конструктивно совмещенных с основными насосами в комбинированных качающих агрегатах. Причем опасность представляют как ярко выраженная кавитация насоса, так и скрытая, при которой срыва напора не наблюдается, а кавитационные каверны присутствуют и динамически взаимодействуют с колебаниями давления. Из практики известны случаи разрушения упорного подшипника комбинированного (имеющего центробежную и шестеренную ступени) топливного насоса авиационных двигателей по причине повышенных виброакустических нагрузок на ротор центробежной ступени.

Анализ работ, посвященных исследованию динамических процессов в осевых шнековых преднасосах [1-3], позволяет сделать вывод о том, что выявление механизма возникновения того или иного дефекта в топливных насосах остается сложной и до конца не решенной задачей. В этих условиях наряду с методами математического моделирования [4] необходимо дальнейшее развитие экспериментальных методов и средств, позволяющих анализировать динамические процессы

в сложных гидравлических системах и агрегатах на всех этапах их разработки. Требуется панорамные методы исследований, обеспечивающие бесконтактное определение собственных частот и форм колебаний шнекового колеса, изучение структурных образований в потоке рабочей жидкости, визуализацию процессов взаимодействия кавитационных структур с элементами конструкции насоса.

Диагностическая система для одновременной регистрации динамических процессов в газожидкостных средах и записи амплитудно-частотных характеристик конструктивных элементов отличается научной новизной. Она может быть создана на основе оптических методов исследований. Для проведения подобных исследований в НИИ акустики машин СГАУ создается диагностический стенд, основанный на методах лазерного «ножа» [5] (визуализация структур течений) и цифровой спекл – интерферометрии [6] (вибромониторинг конструкции).

В данной работе рассмотрены вопросы создания оптического канала на основе метода лазерного «ножа» для изучения кавитационных процессов на входе в шнеко-центробежный насос (ШЦН). Суть метода состоит в том, что с помощью лазерного пучка, трансформированного в световую полосу, высвечивается тонкий слой исследуемого объема, а излучение от рассеивающих частиц,

в частности, кавитационных пузырьков, находящихся в этом слое, записывается с помощью различного вида фото- или телерегистраторов, ориентированных перпендикулярно плоскости лазерного «ножа», с последующей обработкой изображения.

Дано описание разработанной экспериментальной установки и приведены полученные изображения кавитационных структур, как один из результатов начального этапа исследований. На основании сравнительного анализа структурных образований дается заключение об эффективности выполненной доработки входного участка насоса.

1. Описание

экспериментальной установки

Для диагностики двухфазных течений разработан и изготовлен лазерный визуализатор (рис. 1). Он состоит из лазерного излучателя 1 с оптической насадкой 2 и блоком питания 3. Лазер с оптической насадкой расположен на штативе 4. Штатив 4 выставляется в вертикальное положение с помощью регулируемых по высоте опорных винтов 5. С помощью шарнирного узла 6-8 обеспечивается возможность изменения угла наклона оси излучателя в пространстве.

Конструкция оптической насадки представлена на рис. 2. К посадочному участку корпуса лазера 1 с помощью хомута 2 присоединён переходный стакан 3, на котором уста-

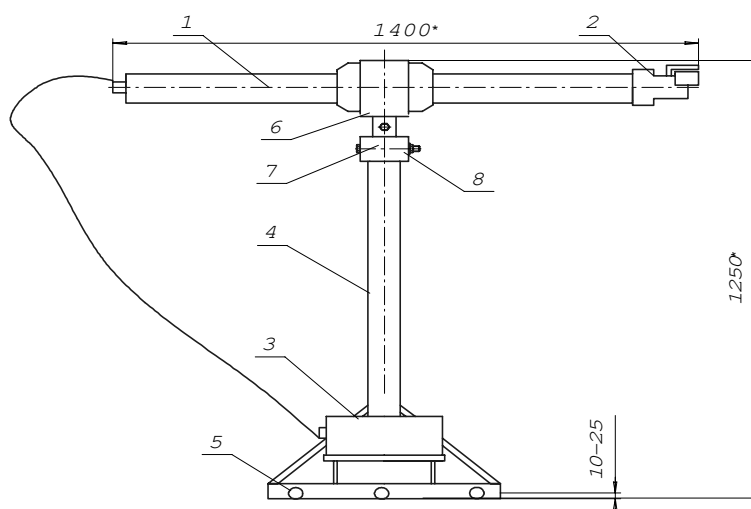


Рис. 1. Схема лазерного визуализатора

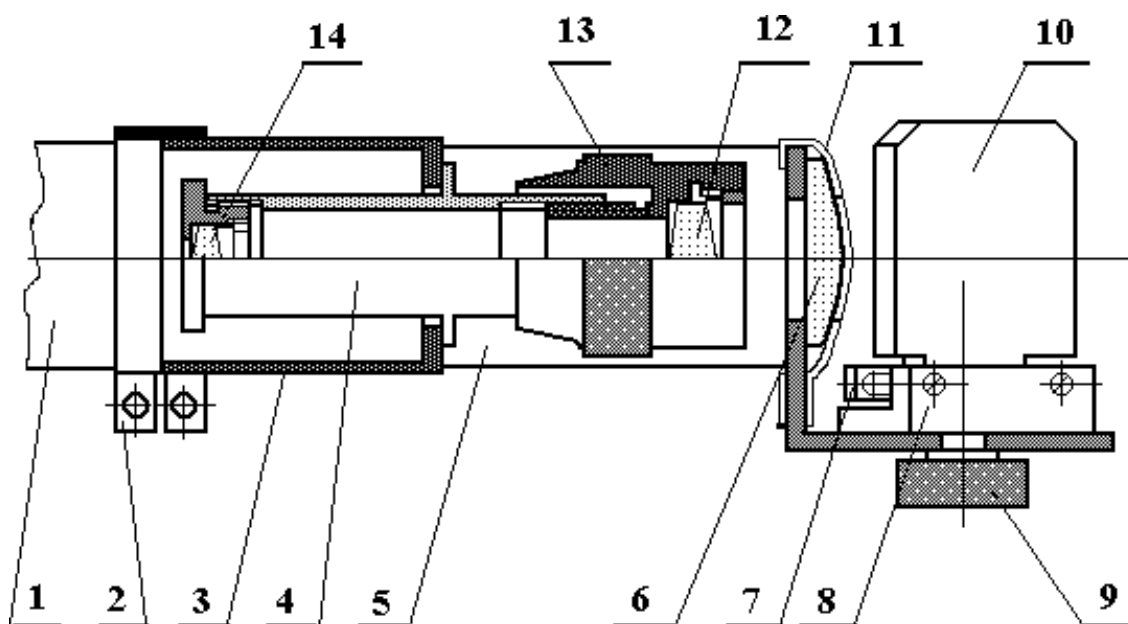


Рис. 2. Конструкция оптической насадки

новлены телескоп 4 и кронштейн 5. На кронштейне 5 с помощью плоского пружинного прижима 11 закреплена цилиндрическая линза 6, а с помощью накладки 7 и основания 8 с винтом 9 – поворотное зеркало 10. Оптическую схему телескопа 4 составляют объектив 12 и окуляр 14. Объектив 12 телескопа установлен в оправе 13, которая связана с корпусом телескопа шестизаходной резьбой с крупным шагом, что обеспечивает продольную подвижку объектива 12 для перефокусировки телескопа по дальности. В качестве источника света в лазерном «ноже» использован He-Ne лазер непрерывного излучения ЛГН-125 с мощностью в луче ~20 мВт.

Необходимое увеличение $\Gamma=3$ телескопа обеспечено надлежащим выбором фокусных расстояний окулярной $f'_{ок}$ и объективной $f'_{об}$ линз: $f'_{ок} = 14 \text{ мм}$, $f'_{об} = 50,5 \text{ мм}$.

Продольная подвижка объектива позволяет перефокусировать телескоп от минимального расстояния 500 мм до бесконечности. Толщина лазерного «ножа» в перетяжке является линейной функцией расстояния и на дистанции 1,5 м равна ~ 1 мм. Фокусное расстояние цилиндрической линзы 6 выбрано таким, чтобы на минимальном расстоянии от нее ширина световой полосы была не менее 200 мм. Поворотное зеркало 10 необходимо для коррекции положения плоскости лазерного «ножа» в пространстве.

Схема экспериментальной установки с созданным лазерным визуализатором 1 и фотокамерой 2 дана на рис. 3. Для введения излучения в рабочий поток была изготовлена оптическая вставка 3 с четырьмя протяженными плоскими окнами (размер окон $28 \times 200 \text{ мм}$). Оптическая вставка введена в топливную магистраль непосредственно на входе в шнековый преднасос. На рис. 3 ориентация световой полосы приведена для изучения продольного или поперечного сечений потока.

2. Основные результаты исследований

Исследования проводились при следующих значениях скорости вращения насоса: $n_1=600$ об/мин; $n_2=1200$ об/мин; $n_3=2400$ об/мин; $n_4=3600$ об/мин; $n_5=4800$ об/мин. Избыточное давление в рабочей среде (керосине) на входе в исследуемый насосный агрегат изменялось ступенчато через 0,1 атм от $p_0=0$ до $p_5=0,5$ атм. На рис. 4 приведены характерные картины структур кавитационных течений, полученные при n_1 и p_0 . Фоторегистрация проводилась с помощью фотоаппарата «Зенит TTL» на цветную пленку типа «Kodak» светочувствительностью 200 ед. Характерная величина выдержки при экспонировании составляла 1/30 секунды.

На рис. 4а течение направлено справа налево, а на рис. 4б направление вращения

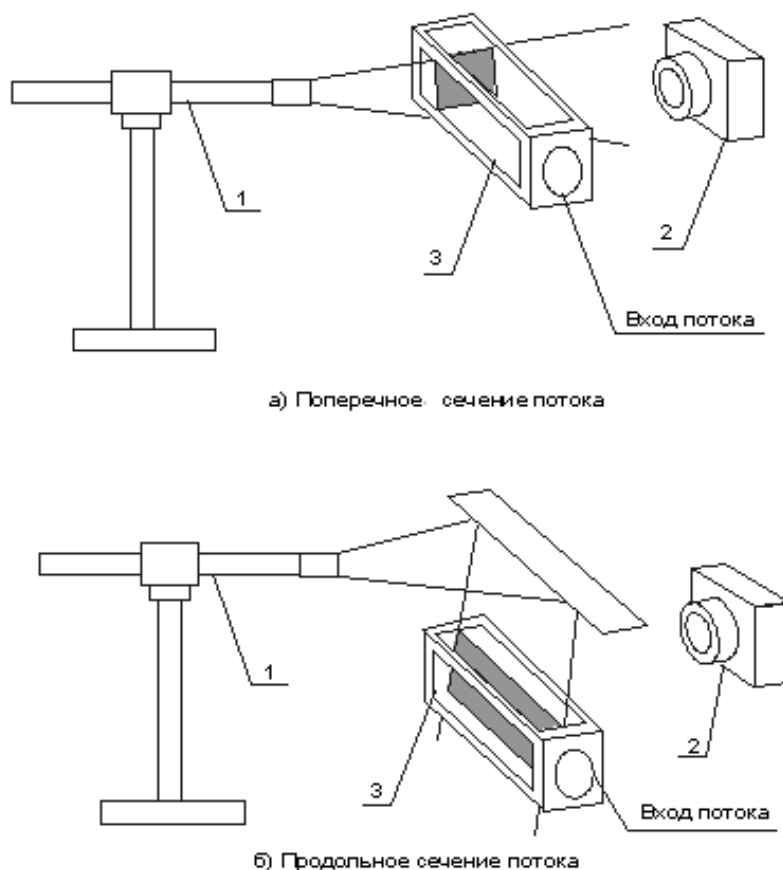


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования потока методом лазерного "ножа"

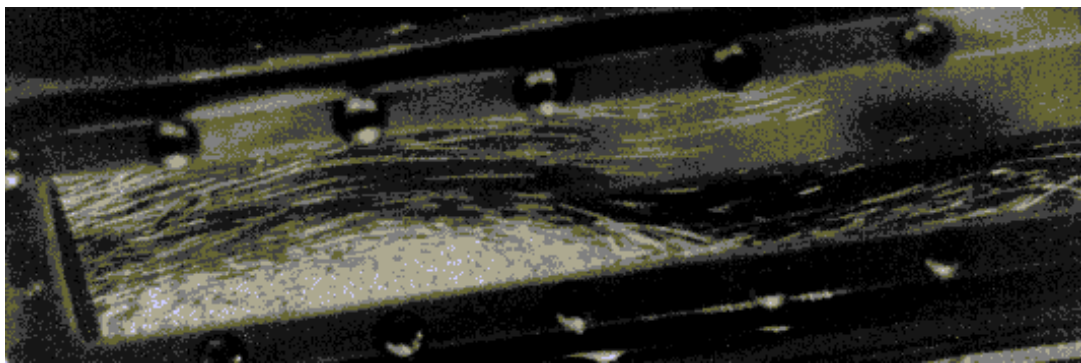
потока - против часовой стрелки. Из рис. 4а видно, что кавитационные структуры могли распространяться вверх против движения потока на всю длину окон вставки (200 мм) и далее. Кавитационные процессы интенсифицировались в области вихревой зоны. При приближении ко входу в шнек наблюдалось нарастание трековых образований в активной (приосевой) части потока. Анализ геометрических характеристик трековых образований таких как длина, форма, диаметр позволяет говорить, соответственно, о скорости, направлении движения и диаметре кавитационного пузырька. От параметров кавитационных пузырьков в треках можно перейти к оценке характеристик потока. Укороченная длина треков на рис. 4б по сравнению с рис. 4а говорит о том, что линейная составляющая скорости потока на входе в ШЦН значительно превышает окружную составляющую.

Кроме фоторегистрации усредненных структур кавитационных течений была выполнена с помощью телекамеры фирмы "Hitachi" формата VHS видеозапись динамических картин кавитационных течений. Ав-

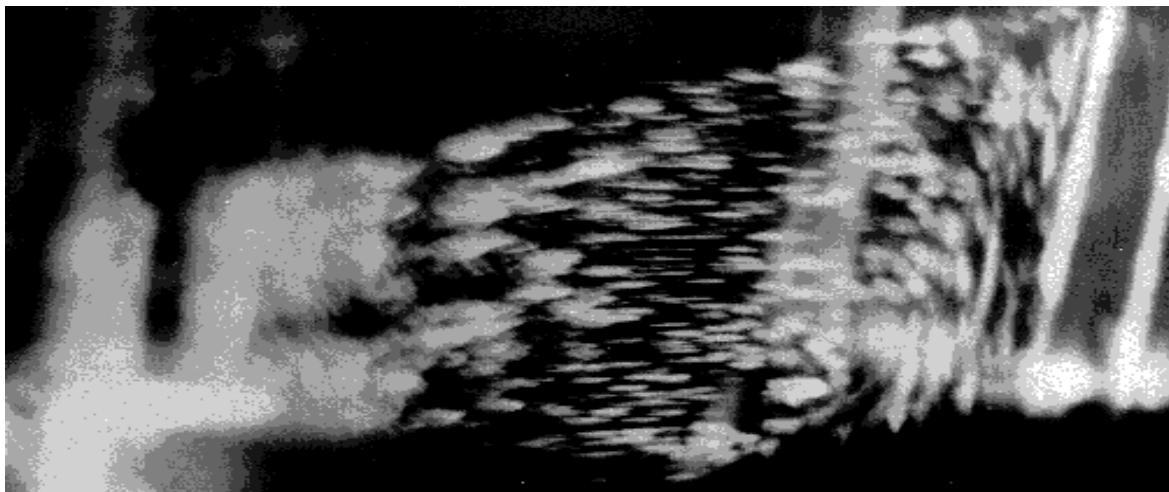
томатический режим работы телекамеры обеспечивал оптимизационную перестройку фокусного расстояния и скорости записи. Получен видеофильм с характерными динамическими картинками структур течений. Кроме метода лазерного "ножа" производилась сравнительная видеозапись с наружной подсветкой кавитационной структуры от стробоскопической лампы-вспышки при изменении частоты импульсов от 0 до 100 Гц.

Показано, что по мере увеличения n при p_0 и p_1 пропорционально возрастала интенсивность кавитационных процессов. Это проявлялось в росте концентрации газовых пузырьков на периферии вихревого потока с формированием приосевого пульсирующего газового шнура. Характерно, что верхняя граница газового шнура наблюдалась на расстоянии не менее 80-100 мм от входа в шнековый преднасос. При этом пульсирующий газовый шнур периодически генерировал локальные газовые жгуты и каверны, которые сносились потоком вниз по течению.

По мере роста давления наддува, начиная с p_2 при всех n привода насоса структура



(a)



(б)

Рис. 4. Характерный вид кавитационных структур (а) в продольном и (б) в поперечном сечениях потока

кавитационных течений резко изменялась: уменьшались размеры газовых пузырьков и снижалась их концентрация. Следует отметить эффект уменьшения прозрачности пузырьков, что создавало видимость помутнения керосина. С ростом p снижалась скорость вихревого движения пузырьков. Они все более походили на высокодисперсную взвесь в движущемся потоке керосина.

Следующий этап изучения структурных образований с помощью метода лазерного «ножа» проводился после установки неподвижного конуса на входе в насос. Согласно [1], данная конструкторская доработка приводит к ограничению выхода кавитационных процессов во входной патрубке ШЦН. Для визуализации особенностей течения керосина в этом случае в качестве индикатора использовался тонкий воздушный слой («пузырь»), который возникал в исходном состоянии системы под верхним окном оптической вставки. В процессе «выдувания» пузыря из вставки наблюдалось взаимодействие

обратных токов (противотоков) керосина с кромкой, обращенной ко входу в насос. В зависимости от интенсивности обратных токов воздушный слой перемещался по длине кюветы, пульсировал, дробился на фрагменты (рис. 5). Если в режиме с p_0 и n_4 «пузырь» доходил лишь до середины кюветы, то при p_3 на всех значениях скорости «пузырь» удалялся в противоположный край кюветы, разбивался на пульсирующие фрагменты и исчезал. Характерный вид структуры в потоке керосина при p_1 и n_1 дан на рис. 6. Данная структура образована пузырьками воздуха, уносимыми потоком керосина из пульсирующего «пузыря» ко входу в насос. Эти структурные образования исчезали с ликвидацией поверхностного «пузыря». Они отличаются от кавитационных структур, показанных на рис. 4 тем, что не было обнаружено скоростных продольных треков и отсутствовала крутка потока. Следует отметить, что после выдувания «пузыря» из кюветы в режимах с максимальными p и n навстречу потоку из

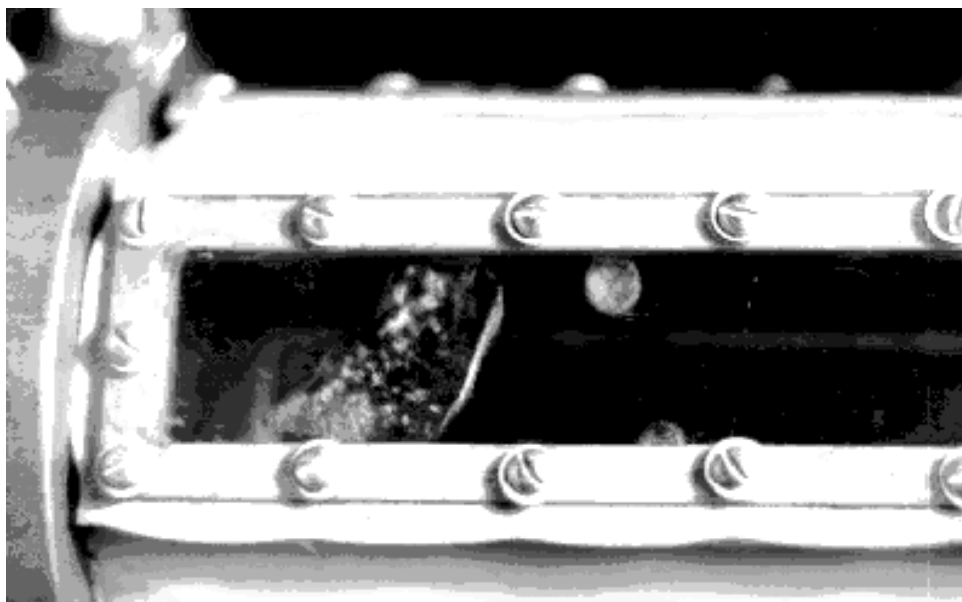


Рис. 5. Характерный вид пульсирующего воздушного «пузыря» с двумя отделившимися фрагментами под верхним окном оптической вставки

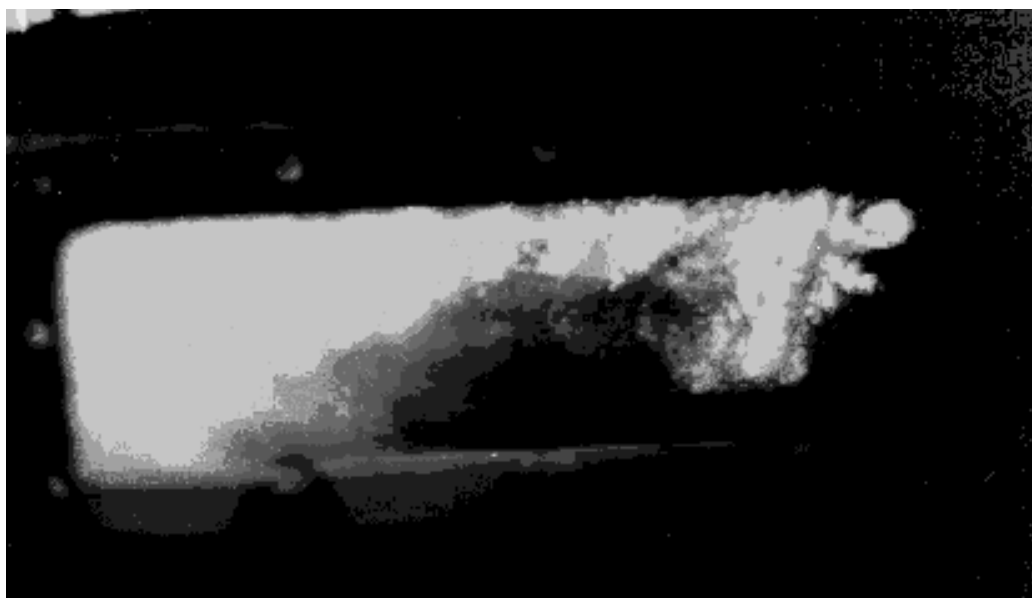


Рис. 6. Характерный вид структурных образований в потоке керосина при p_1 и n_1 в режиме с воздушным «пузырем» (см. рис. 5).

ШЦН выносились высокодисперсные образования, проявившиеся в виде волн помутнения керосина. Эти образования могут быть связаны с температурными градиентами в потоке и выделением паровой фазы. Поскольку введение неподвижного конуса перед предвключенным шнеком не снимает проблемы кавитации в ШЦН, по-видимому, требуются исследования в проточной части насоса.

На основании проведенных исследований можно сделать следующее заключение.

1. Выполненная апробация созданной на основе метода лазерного «ножа» системы визуализации структур кавитационных течений на входе в преднасос подтвердила ее эффективность для получения усредненных картин кавитационных образований.

2. Получение количественной информации о размерах, скорости и концентрации кавитационных пузырьков требует введения в оптическую схему установки импульсного лазера.

3. Метод лазерного “ножа” будет более востребован при применении в оптической схеме электронных средств регистрации и обработки изображений.

Авторы признательны научному сотруднику к.т.н. Прокофьеву А. Б. за внимательное прочтение рукописи и сделанные замечания. Работа поддержана грантом Минпромнауки РФ №40-165.11.0107.

Список литературы

1. Чебаевский В. Ф., Петров В. М. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко-центробежных насосов. М.: Машиностроение, 1973. - 152 с.

2. Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. М.: Машиностроение, 1977. – 180 с.

3. Ивашин А. Ю., Крючков А. Н., Прокофьев А. Б. Влияние скрытых кавитационных процессов на колебания элементов топ-

ливного насоса авиационного ГТД // Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Вып. 3.4.2. – Самара, 1999.- С.148-153.

4. Создание конечно-элементной модели шнекового насоса / А. Н Крючков., А. Б. Прокофьев, В. А. Баннов, А. А. Иголкин // Сб. докладов международной н.-технической конфер., посвященной памяти генер. конструктора аэрокосмич. техники акад. Н. Д. Кузнецова - Самара, 2001, часть 2. - С. 84-88.

5. Журавлев О. А., Мединская Л. Н., Шорин В. П. Лазерная диагностика двухфазных течений. Уч. пособ /Куйбыш. авиац. инст. Куйбышев, 1989. - 74 с.

6. Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок /О. А. Журавлев, С. Ю.Комаров, К. Н. Попов, А. Б. Прокофьев // Компьютерная оптика. Самара-Москва. 2001, № 21. - С. 141-149.

DESIGN OF A LASER SYSTEM OF VISUALIZATION OF CAVITATIONAL PROCESSES ON AN INPUT OF A PUMP OF HIGH POWER ENGINES

© 2002 V. P. Shorin, O. A. Zhuravlev, A. V. Ivchenko, S. Y. Komarov,
A. N. Kruchkov, Y. D. Scheglov

The Machine Acoustics Institute
of Samara State Aerospace University

The problems of design of a diagnostic system based on a method of laser sheet for a study of cavitation processes on an input of a pump of an air high power engine are considered. The description of a designed experimental system and the obtained images of cavitation structures are given. Using the analysis of the cavitation structure the conclusion about efficiency of the designed improving of an input channel of the pump is given.