

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ В ПОЛЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ВИБРАЦИИ

©2011 Н. И. Лиманова¹, Ю. С. Левкин²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

²Тольяттинский государственный университет

В настоящей экспериментальной работе рассмотрен пробковый режим с малым газовым фактором двухфазного потока. Целью работы являлось получение структурных моделей аналогов первоначальной структуры от воздействия поперечной вибрации и наличие возможностей их использования в промышленности. Построены графики, аппроксимированы результаты и выведены эмпирические формулы. Получены четыре структурные модели, на которые делится первоначальная пробковая структура от воздействия на неё поперечной вибрации.

Пробковая структурная модель, поперечная вибрация, вибрационный импульс, двухфазный поток, двухфазный режим, трубопровод, вибрационное ускорение, пузырьковое образование.

Известно, что характер движения любого топлива в системе обвязки транспортных средств при работающих двигателях представляет научный интерес, т.к. является ключом к пониманию гидрофизических процессов. Модель с пробковой структурой, характеризующая топливо как авиационных, так и ДВС, применялась и прежде. Известны гидравлические расчёты горизонтальных, восходящих и нисходящих двухфазных потоков, которые описывают закономерности движения топлива. Вибрационные процессы оказывают влияние на структуру газожидкостных потоков. Воздействие вибрации на двухфазные потоки порождает изменения в первоначальной структуре потока.

Любое топливо как для двигателей внутреннего сгорания, так и для летательных аппаратов работает в разных температурных режимах. Таким образом, температура превращает жидкую фазу - как авиакеросин, так и авиабензин - в двухфазную смесь. При высоких рабочих температурах образуются пузырьки газовой фазы, а при низких температурах растворённая в углеводородном топливе вода превращается в лёд. Температурный режим, сопутствующий массовому обмену фаз любого топлива от ДВС до керосина летательных аппаратов, проявляет себя даже при неработающих двигателях. Сравнительно небольшое в межфазном процентном отношении количество свободного газа соответствует пробковой структуре двухфазного потока.

В работе рассматривается газожидкостная смесь, у которой в процентном отно-

шении газовая фаза адекватна растворённому газу топлива летательного аппарата. В России производятся две марки авиабензина ГОСТ1012-72 Б91/92 и Б91/115 с октановым числом более 100 единиц. Движение рассматриваемой газожидкостной смеси по трубопроводной системе на горизонтальных участках представлено в виде пробковой структуры двухфазного потока. В работе производился эксперимент по наложению поперечной вибрации на газожидкостный поток, структура которого соответствовала структуре авиабензина при рабочих параметрах его использования. Экспериментальный диапазон частот варьировался в пределах 30÷400Гц, что укладывается в вибрационный диапазон частот топливных трубопроводных систем самолётов с турбовинтовыми двигателями (300÷400Гц).

Экспериментальные опыты проводились на стационарном стенде (рис. 1) ДЭВС – 200 А – 1. Температура воды 7,5°C, а воздуха 8,7°C. Небольшая разница температур сводит к минимуму объёмное расширение фаз газожидкостного потока. Воздух подавался заводской компрессорной установкой, расход определялся ротаметром РС-5 №6091649 (2), а расход воды определялся рычажными весами 3. Совокупность расходов фаз двухфазных потоков является определителем структур двухфазных потоков. Сочетание расхода жидкой фазы $Q_{\text{ж}} = 1,8 \text{ л/мин}$ с расходом газообразной $Q_{\text{г}} = 1,05 \text{ л/с}$ позволило получить дисперсную структурную модель в прозрачной прямоугольной трубе 4 (4×20 мм).

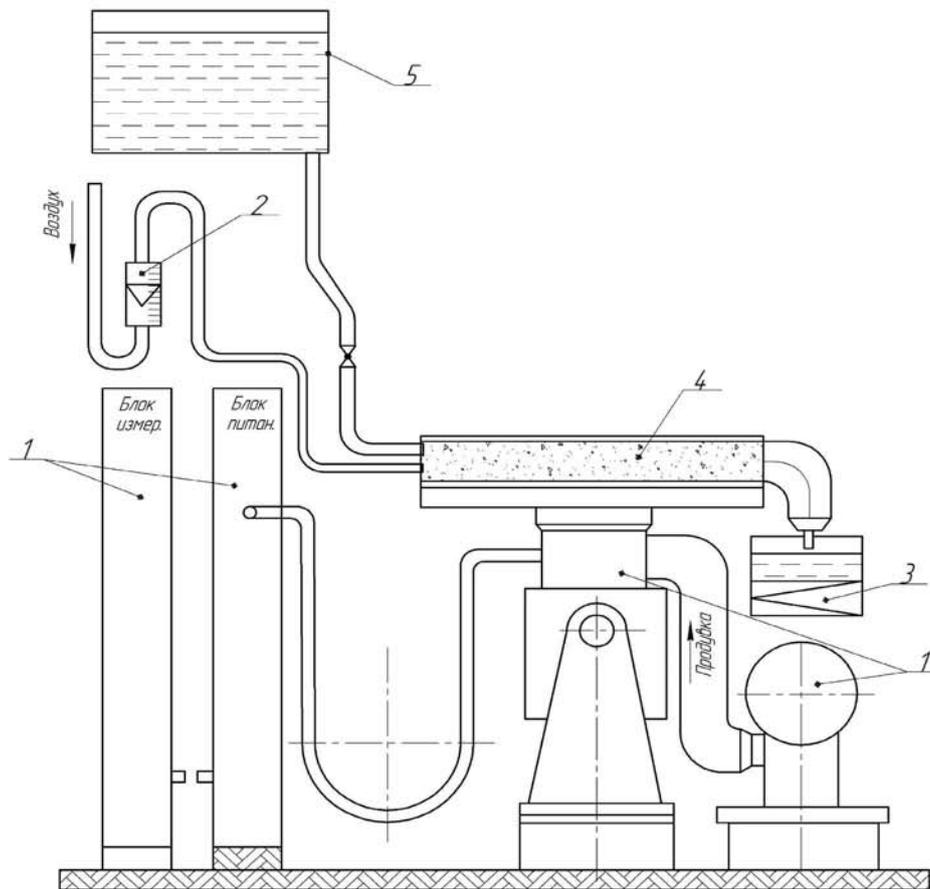


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Истечение воды происходило из алюминиевого бака 5. Уровень водяного столба составлял 2660 мм. Газожидкостная смесь, проходя через прозрачную трубу, фотографировалась, что и являлось определением структуры потока в поле поперечной вибрации. Опыты проводились на частотах от 30 до 400 Гц при вибрационном ускорении от $n_v = 1$ и до технически разрешённых пределов тех или иных вибрационных ускорений.

Классическая пробковая структура, попав в поле поперечной вибрации, трансформируется в новые структурные модели, образование которых связано с определёнными частотами вибрации (f_v) и вибрационным ускорением (n_v). Фактический материал фотосессии путём визуального сравнения экспериментальных образцов позволяет разделить пробковую структуру на четыре вибрационных аналога. Каждая из перечисленных структурных моделей может быть получена по эмпирическим формулам, приведённым ниже. Классическая пробковая структура под действием вибрации подразделяется на четыре новых вибрационных подструктуры,

которые образуют следующие новые режимы:

- 1) Δ – вибрационно-пробковый режим;
- 2) \circ – режим поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии;
- 3) \square – режим вибрационно-деформированной газовой взвеси;
- 4) \diamond – режим вибрационно-кавернозных пузырей.

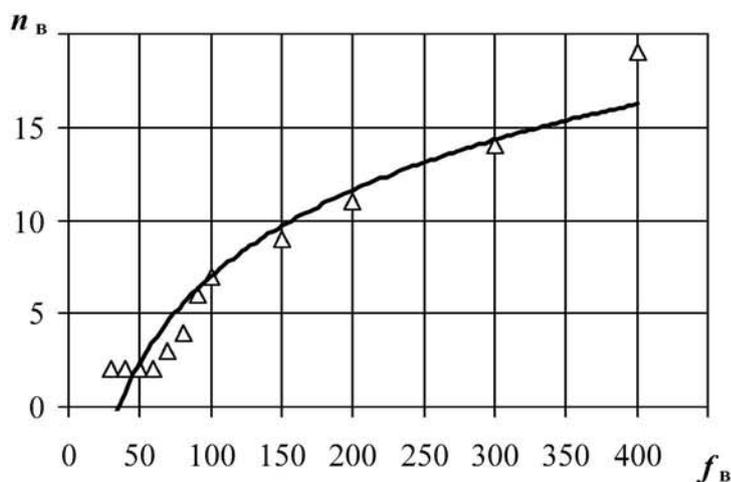
Каждый структурный аналог обладает своими физическими характеристиками. Рассмотрим их более подробно.

1. Вибрационно-пробковый режим. Вибрационно-пробковый режим получается при слабых импульсах вибрационных ускорений, которые фактически перемешивают ЖФ, не изменяя рисунка структуры ДП. Такую структурную модель при первом приближении можно считать классической пробковой структурой, наделённой способностью к внутрифазным переходам (обогащение воздухом ЖФ, изменение процесса дегазации и т.д.).

Такую структуру может характеризовать табл. 1 и графическая зависимость вибрационных параметров (рис. 2).

Таблица 1. Характеристика вибрационно-пробкового режима

f_B	Вибрационно-пробковый режим											
	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	300	400
n_B	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 3	≤ 4	≤ 6	≤ 7	≤ 9	≤ 11	≤ 14	≤ 19



$$n_B = 6,6826 \ln(f_B) - 23,787$$

$$R^2 = 0,9212$$

Рис. 2. Зависимость вибрационного ускорения при вибрационно-пробковом режиме газожидкостных потоков от частоты вибрации

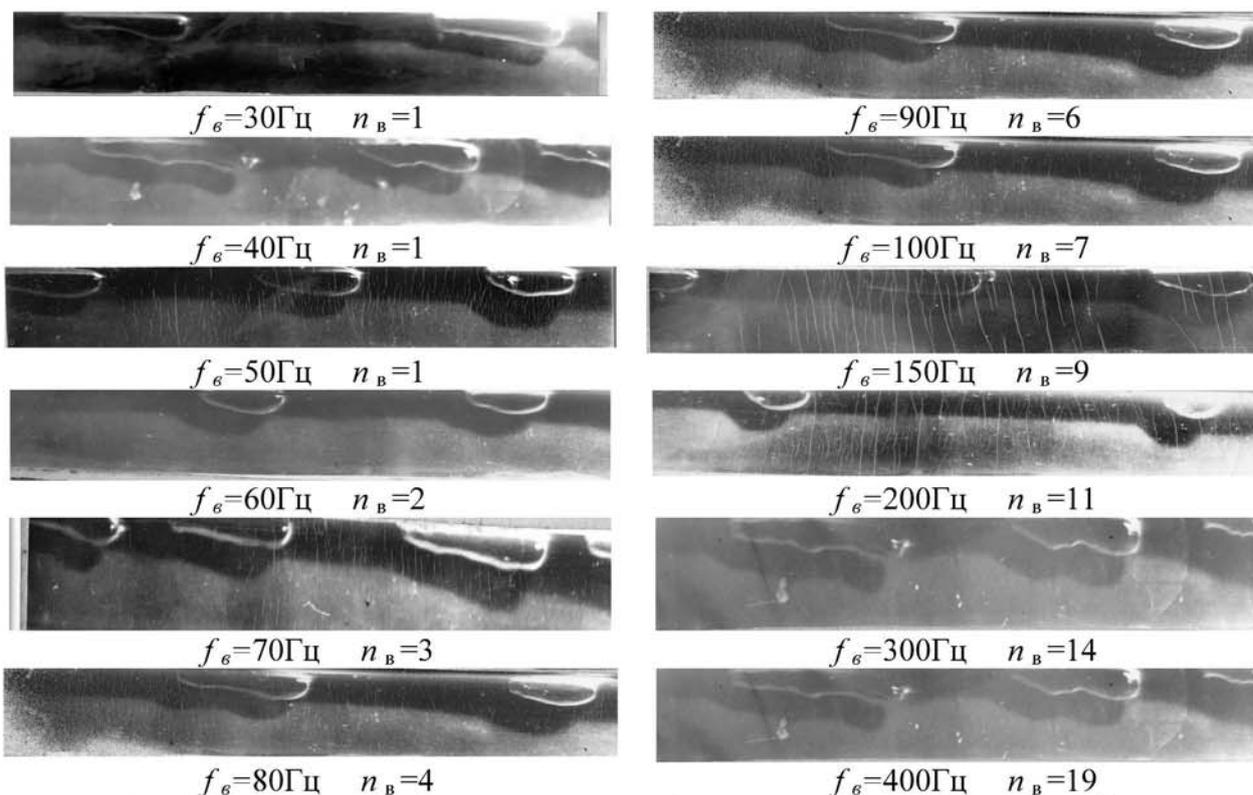


Рис. 3. Характер изменения структуры газожидкостного потока под действием вибрации

Отличие вибрационно-пробкового режима от пробкового во внутреннем энергетическом состоянии: вся жидкая фаза ДП меняет поступательно - горизонтальное движение на синусоидальное гармоническое; вибрационно-пробковую структуру можно получить при помощи эмпирической формулы

$n_B \leq 6,6826 \ln(f_B) - 23,787$; физико-биологическое состояние среды, находящейся в поле вибрации, представляет позитивный экологический интерес; бережное волнообразное импульсное перемешивание способствует обогащению кислородом ЖФ, способствуя развитию фауны и флоры. На фотографиях не видны де-

формации на пузырьках ГФ, что характеризует слабость импульсных воздействий.

Вибрационно-пробковый режим получен при наложении поперечной вибрации на пробковую двухфазную структуру потока, отличие которого от первоначальной структуры в гармонически - синусоидальном течении струй жидкой фазы.

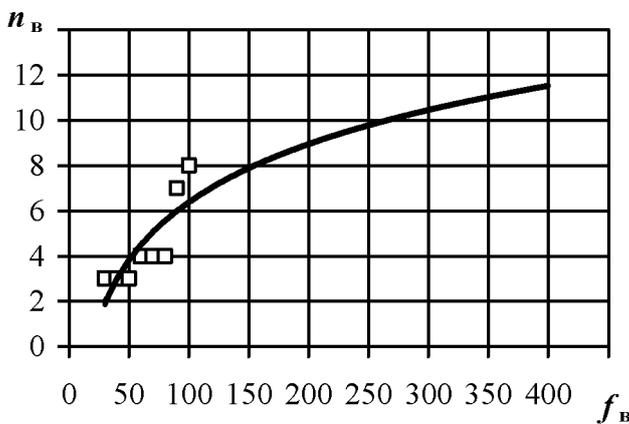
2. Режим поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии. Изменения сечений труб и их конфигураций, которые несомненно оказывают влияние на течения ДП, способствуют усложнению гидродинамической ситуации транспорта продукта. На поверхности раздела фаз возникают особые силовые, а при не изотермическом течении и тепловые взаимодействия, которые самым существенным образом сказываются на изменениях полей скоростей течения, давле-

ний и температур. Вибрация стабилизирует ДП, снимая ряд проблем гидродинамического характера, превращая структурную модель в узнаваемую и желаемую для того или иного процесса её применения. Разложение пробковой структуры ДП при помощи вибрационных параметров способствует их применению в разных технологических процессах. Режим поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии является самым желаемым из всех встречающихся аналогов пробковой структуры, ДП, т. к. сгорание топлива в ДВС не приводит к негативным последствиям их работы.

Такую структуру может характеризовать табл. 2 и графическая зависимость вибрационных параметров, приведённых на рис. 4.

Таблица 2. Характеристика режима поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии

f_B	Режим поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии										
	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	300
n_B	2-3	2-3	2-3	2-4	3-4	3-4	6-7	7-8	-	-	-



$$n_B = 3,7231 \ln(f_B) - 10,78$$

$$R^2 = 0,6447$$

Рис. 4. Зависимость вибрационных ускорений от частоты вибрации для режима поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии

Режим поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии встречается в топливных системах трубопроводов ДВС, являясь желательным фактором бесперебойной работы двигателя, т.к. разбивает пузыри пробковой структуры. Эта структурная модель представлена фотоматериалом рис. 4 и табл. 2, что соответствует эмпирической зависимости $6,6826 \ln(f_B) - 23,787 \geq n_B \geq 3,7231 \ln(f_B) -$

$10,78$. Аналог рассматриваемой структурной модели заканчивается на $f_B=100$.

Режим поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии получен от наложения поперечной вибрации на пробковую двухфазную структуру и характеризуется измельчением первоначальных пузырей ГФ вибрационными импульсами жидкой фазы.

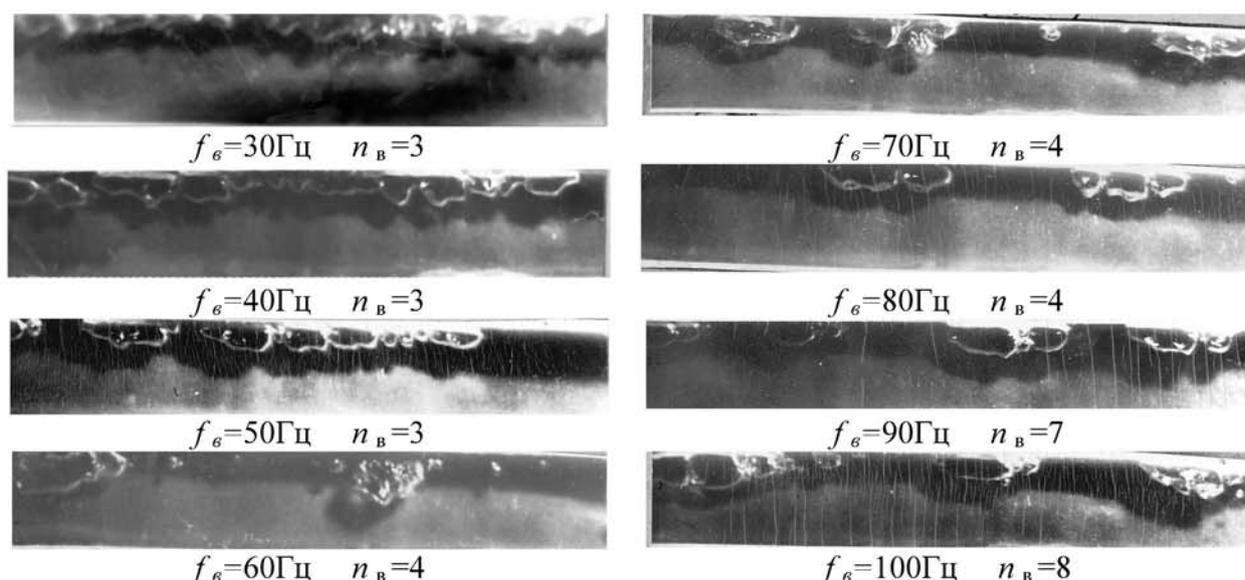


Рис. 5. Режим поверхностно-пузырьковой вибрационной эмульсии

Вибрационное измельчение пузырей способствует увеличению подвижности как отдельно взятой фазы, так и всего ДП. Перспективным можно считать изучение влияния поперечной вибрации на улучшение как межфазной подвижности классической первоначальной структуры, так и всего ДП. Пробные опыты дали положительные результаты. Было получено устранение продольной вибрации (внутрифазных биений), вызванных разной скоростью фаз, за счёт структурной стабилизации, которую гарантирует поперечная вибрация.

При совместном транспортировании углеводородов двухфазных структур, особенно газированных нефтепродуктов, происходит образование пробковых структур. Образование огромных пузырей, особенно при транспортировании по пересечённой местности, не позволяет продавить огромный столб жидкости. Вибрационные воздействия на пробковую структуру ДП позволили бы решить эту проблему с большей пользой, чем сжигать такие пробки факельным способом.

3. Режим вибрационно-деформированной газовой взвеси. Режим вибрационно-деформированной газовой взвеси является аналогом пробковой структуры ДП, а

процесс её движения в трубах представляет собой комплекс гидродинамических явлений, законы которых существенно сложнее, чем законы гидродинамики однородных сред. Полученный вибрационный аналог ДП по своим гидродинамическим характеристикам в первом приближении относится к однофазному потоку, т.к. вибрационное воздействие позволяет нейтрализовать ГФ путём её поглощения ЖФ. Полученная структура была получена экспериментально, т.к. метод экспериментального исследования ДП является перспективным. Сложная совокупность влияний самых разнообразных по своему существу и природе факторов на процесс движения смесей делает далеко не простым получение на основе теоретического анализа расчётных уравнений, устанавливающих зависимость между основными характеристиками ДП. Так, исследования [1] показывают, что если процесс движения смесей и может быть математически описан в форме системы дифференциальных уравнений, то интегрирование таких уравнений оказывается или невозможным, или исключительно технически сложным.

Результаты проведённых исследований приведены в табл. 3, по которой построен график на рис. 6.

Таблица 3. Характеристика режима вибрационно-деформированной газовой взвеси

f_B	Режим вибрационно-деформированной газовой взвеси									
	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200
n_B	$3 \geq$	$4 \geq$	$4 \geq$	$5 \geq$	$7 \geq$	-	-	-	-	-

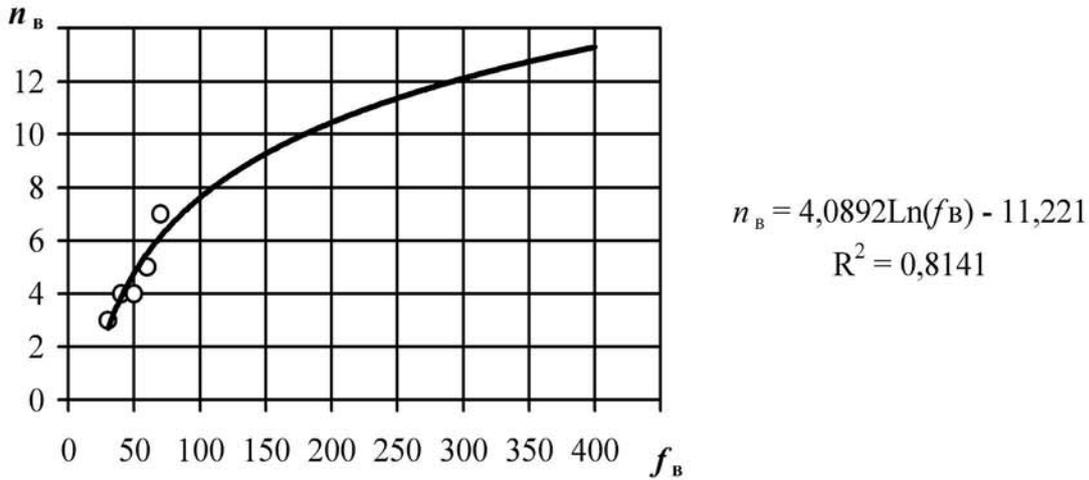


Рис. 6. Зависимость вибрационных ускорений от частоты вибрации для режима вибрационно-деформированной газовой взвеси

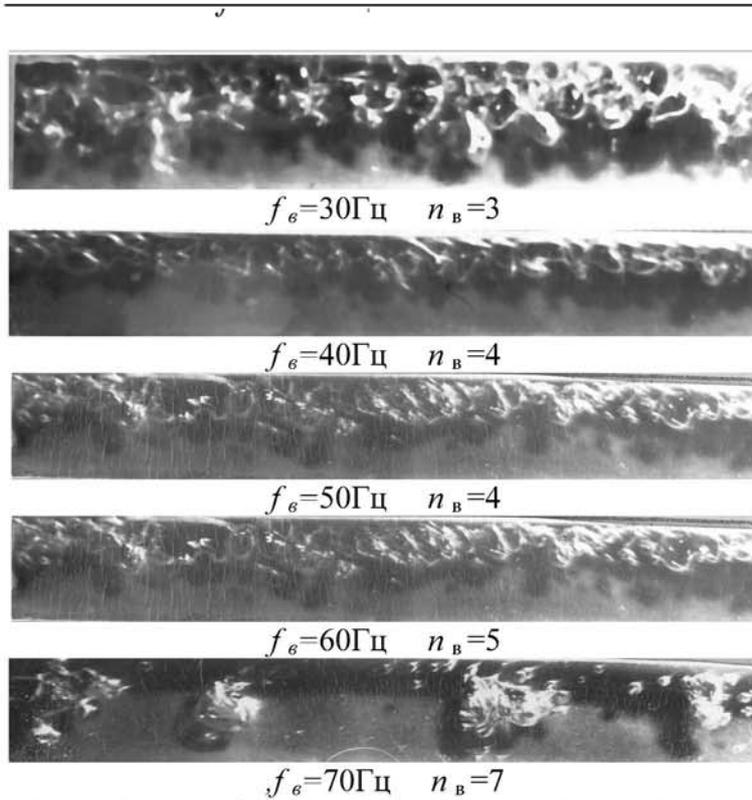


Рис. 7. Режим вибрационно-деформированной газовой взвеси

Режим вибрационно-деформированной газовой взвеси является третьим аналогом пробковой структуры двухфазного потока. Рассматриваемая структура теряет автономный характер межфазного контакта.

Нейтрализация роста образования пузырей ГФ снижается, а при значительных вибрационных ускорениях избавляется от продольной вибрации. ЖФ фактически проглатывает пузыри.

Классическая пробковая структура дестабилизирует течение двухфазного потока,

вызывая пульсацию при смешивании с жидкой фазой, являясь одной из гидродинамических её характеристик. Толерантность её аналога более предпочтительна в применении. Режим вибрационно-деформированной газовой взвеси (рис.7) задаётся и определяется табл. 3 и следующей эмпирической формулой:

$$7,1124 \ln(f_B) - 25,49 \geq n_B \geq 4,0892 \ln(f_B) - 11,221.$$

Режим вибрационно-деформированной газовой взвеси получен в диапазоне вибрационных параметров эмпирической формулы при вибрационном воздействии на пробковую

двухфазную структуру потока, особенно-стью которого является отсутствие контакта деформированной газовой фазы со стенками рабочей трубы.

4. Режим вибрационно-кавернозных пузырей. Режим вибрационно-кавернозных пузырей физически можно сравнить с дробящими газовую пузырьковую фазу “иглами”, толщина которых зависит от частоты вибрации, а сила удара – от вибрационных ускорений.

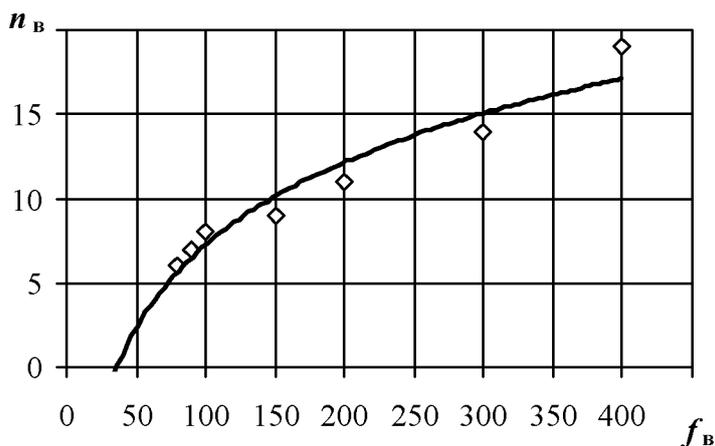
Низкочастотные колебания порождают длинноволновые импульсы, что соответствует дроблению пузырей тупыми широкими волнами подобных “топоров-колунов”, высокочастотные колебания бомбардируют пузыри вибрационными импульсами, длины

волн которых тем меньше, чем выше частота вибрации. Пузыри ГФ не могут быть разрушены от таких воздействий, т.к. они хотя и подвергаются давлению аномальных воздействий вибрации, однако, не могут изменить их целостность из-за внутрифазного давления ЖФ. Вибрационное воздействие сводится лишь к мелкокавернозной их деформации.

Из сказанного следует, что такое физическое воздействие способствует очистке парафинистых труб при прокачке по ним спецреагентов в нефтяной промышленности, росту кристаллической решетки в физико-химических исследованиях. Режим вибрационно-кавернозных пузырей (рис. 8,9) определяется табл. 4 и эмпирической формулой $n_{\text{в}} \geq 7,1124 \ln(f_{\text{в}}) - 25,49$.

Таблица 4. Характеристика режима вибрационно-кавернозных пузырей

$f_{\text{в}}$	Режим вибрационно-кавернозных пузырей						
	80	90	100	150	200	300	400
$n_{\text{в}}$	$6 \geq$	$7 \geq$	$8 \geq$	$9 \geq$	$11 \geq$	$14 \geq$	$19 \geq$



$$n_{\text{в}} = 7,1124 \ln(f_{\text{в}}) - 25,49$$

$$R^2 = 0,9339$$

Рис. 8. Зависимость вибрационных ускорений от частоты вибрации для режима вибрационно-кавернозных пузырей

В результате проведенной экспериментальной работы были получены структурные модели вибрационного пробкового двухфазного режима.

Режим вибрационно-кавернозных пузырей получен от наложения поперечной вибрации на пробковую двухфазную структуру потока, отличие которого от первоначальной структуры в шероховатой оболочке пузырей газовой фазы, не лишенных первоначального объема.

В нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности существуют проблемы очистки труб от парафинистых образований внутри их ствола. Обычно этими вопросами занимаются пропаривающие агрегаты. Наложение вибрации с её параметрами рассматриваемой структуры в разы увеличит производительность, т.к. бомбардировка парафинистых образований подобна пузырям ГФ. Идентичность таких явлений очевидна.

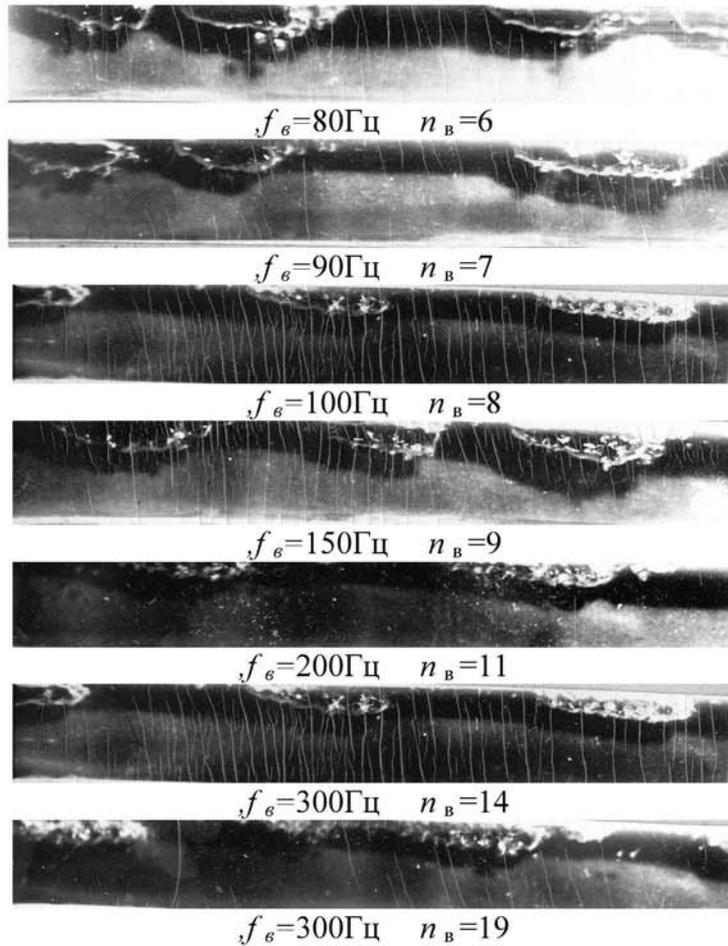


Рис. 9. Режим вибрационно-кавернозных пузырей

В авиационной промышленности частоты от 300÷400 и более Гц несомненно несут разрушительную способность обвязке топливной системы, т.к. возможен кавитационный эффект локально-нормальных (перпендикулярных) микроучастков ЖФ в местах атаки вибрационных импульсов с параметрами рассматриваемой структуры. Мерой безопасности может служить плотно

притянутая к корпусу топливная обвязка, минимизирующая вибрационные ускорения этой системы.

Библиографический список

1. Телетов, С.Г. Вопросы гидродинамики двухфазных смесей [Текст] / С.Г. Телетов // Вестн. Моск. ун-та. 1958. №2.

DIAGNOSTICS OF STATE GAS-FLUID OF FLOWS IN THE FIELD OF CROSS VIBRATION

© 2011 N. I. Limanova¹, U. S. Levkin²

¹Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

²Togliatti State University

In the present experimental operation the pith mode with the small gas factor of a two-phase flow is considered. The operation purpose was obtaining of structural models of analogs of initiating structure from influence of cross vibration and presence of possibilities of their usage in the industry schedules Are constructed, results are approximated and empirical formulas are deduced. Four structural models on which the initiating pith structure from influence on it of cross vibration shares are received.

Pith structural model; cross vibration; vibrational pulse; a liquid phase; a two-phase flow; a two-phase mode; a gas phase; the pipeline; frequency of vibration; vibrational acceleration a liquid phase; vibrational parameters a liquid phase; bubble formation.

Информация об авторах

Лиманова Наталия Игоревна, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: Nataliya.I.Limanova@gmail.com. Область научных интересов: автоматизированные системы управления, датчики для систем измерения, контроля и управления, математическое и компьютерное моделирование гетерогенных систем.

Левкин Юрий Степанович, кандидат технических наук, доцент тольяттинского государственного университета. Тел.: (8482) 36-19-88, (8482) 53-95-65. E-mail: pe@tltsu.ru. Область научных интересов: математическое и компьютерное моделирование гетерогенных систем.

Limanova Nataliya Igorevna, doctor of technical sciences, professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: Nataliya.I.Limanova@gmail.com. Area of research: systems of automatic control, sensors for automatic systems, mathematical and computer modeling of the processes in heterogeneous systems.

Levkin Yuriy Stepanovich, candidate of technical Sciences, associate professor of Togliatti State University. Phone: (8482) 36-19-88, (8482) 53-95-65. E-mail: pe@tltsu.ru. Area of research: mathematical and computer modeling of the processes in heterogeneous systems.