

**ЗАТУХАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ГИДРОУДАРНЫХ ВОЛН  
В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПРОТЯЖЁННЫХ ТРАКТОВ СИСТЕМ ПИТАНИЯ  
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**С. А. Барабанов<sup>1</sup>, В. И. Бирюков<sup>2\*</sup><sup>1</sup> ООО «Энергоавтоматика»

Российская Федерация, 127206, г. Москва, Чуksин тупик, 9

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Российская Федерация, 125993, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

\*E-mail: aviatrix@mail.ru

*Волновые процессы в трубопроводных системах являются причиной неравномерности расходов подаваемых через них жидкостей. При открытии или закрытии регуливающей арматуры системы питания жидкостных ракетных двигателей возникают одиночные ударные волны, которые являются возмущениями давления в широком спектре частот и могут приводить к возбуждению неустойчивости рабочего процесса в газогенераторах или камерах сгорания. Целью работы является экспериментальное исследование процессов затухания вынужденных колебаний и одиночных гидроударных волн в турбулентных потоках слабосжимаемой капельной жидкости в гладких гидравлических магистралях круглого сечения. Поскольку процесс затухания ударных волн заметен только в протяженных трактах с отношением длины к диаметру трубопровода более нескольких тысяч, то методология проведения данной работы была построена на возбуждении гидроударных волн в магистральной транспортной системе, осуществляющей перекачку углеводородных горючих и регистрацию давления датчиками, расставленными равномерно вдоль магистрали. При исследованиях создавались возмущения с амплитудой более чем в 2 раза большей уровня постоянного гидродинамического шума. Одиночные гидроударные волны возбуждались путем проведения отбора жидкости. При этом в ответ на открытие крана (начало отбора) генерировалась волна разрежения, а на закрытие – волна сжатия. Проведенный спектральный анализ сигнала показал, что основная часть спектра гидродинамических колебаний находится в частотном диапазоне до 10 Гц. Более высокие частоты, генерируемые работой насосных агрегатов, быстро затухают. В результате экспериментов была получена аппроксимационная зависимость декремента затухания одиночных волн сжатия и разрежения в виде функции от чисел Рейнольдса. При переходных режимах течения жидкости от ламинарного к турбулентному динамические изменения происходят внутри ламинарного слоя и показатель затухания ударной волны стремится к постоянной величине. На основании сделанных предположений экспериментальные точки аппроксимированы экспоненциальной кривой вида  $y = \eta_0 + A[1 - \exp(-Bx)]$ .*

*По результатам проведенной обработки были получены значения для коэффициентов и выполнено сравнение расчетных данных с результатами экспериментов. Показано удовлетворительное согласие результатов испытаний на модельной установке и на протяженных магистралях. Полученная экспериментальная зависимость, описывающая затухание гидроударных волн в турбулентных потоках, используется при проведении инженерных расчетов систем питания жидкостных ракетных двигателей на кафедре ракетных двигателей в Московском авиационном институте.*

*Ключевые слова:* гидроударная волна, спектр частот, декремент затухания, резонанс, турбулентность, число Рейнольдса.

**ATTENUATION OF THE COMPELLED FLUCTUATIONS AND HYDROSHOCK WAVES  
IN THE TURBULENT STREAM OF EXTENDED PATHS OF POWER SUPPLY SYSTEMS  
OF LIQUID ROCKET ENGINES**S. A. Barabanov<sup>1</sup>, V. I. Biryukov<sup>2\*</sup><sup>1</sup> JSC “Power automatics”

9, Chuksin deadlock, Moscow, 127206, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)

4, Volokolamskoe shosse, GSP-3, Moscow, 125993, Russian Federation

\*E-mail: aviatrix@mail.ru

*Wave processes in pipeline systems are at the bottom of non-uniformity of the expenses submitted liquids through them. At opening or closing of regulating armature of a power supply system of liquid rocket engines there are single shock waves which are pressure indignations in a wide spectrum of frequencies and can lead to excitation of instability of working process in gas generators or combustion chambers. The work purpose is the experimental research of processes of attenuation of the compelled fluctuations and single hydroshock waves in turbulent streams poorly compressed a drop liquid in smooth hydraulic highways of round section. As process of attenuation of shock waves is swept up only in extended paths with the relation of length to diameter of the pipeline more than several thousand the methodology of carrying out of the given work has been constructed on excitation of hydroshock waves in the main transport system which is carrying out swapping hydrocarbonic combustible and registration of pressure by gauges, placed in regular intervals along a highway. At researches indignations with amplitude more than in 2 times of level of constant hydrodynamic noise were created. Single hydroshock waves were raised by carrying out the selection of liquid. Thus in reply to crane opening (the selection beginning) the wave pressure reduction, and on closing – a compression wave was generated. The carried out spectral analysis of a signal has shown that the basic part of a spectrum of hydrodynamic fluctuations is in a frequency range to 10 Hz. Higher frequencies generated by work of pump units, quickly fade. As a result of experiments approximation dependence of decrement of attenuation of single waves of compression and pressure reduction in the form of function from Reynolds's numbers has been received. At transitive modes of a current of a liquid from laminar to turbulent dynamic changes occur in a laminar layer and the indicator of attenuation of a shock wave aspires to a constant. On the basis of the made assumptions experimental points are approximated exponential by a kind curve  $y = \eta_0 + A[1 - \exp(-Bx)]$ . By results of the spent processing values for factors have been received and comparison of the settlement data with results of experiments is executed. The satisfactory consent of results of tests to modeling installation and extended highways is shown. The received experimental dependence describing attenuation of hydroshock waves in turbulent streams, is used at carrying out of engineering calculations of power supply systems of liquid rocket engines on chair "Rocket engines" at the Moscow aviation institute.*

*Keywords: a hydroshock wave, a spectrum of frequencies, decrement of attenuation, a resonance, turbulence, Reynolds's number.*

**Введение.** Разработанные в 1980-х гг. маршевые жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) РД 170 и РД 171 для ракетносителей (РН) «Энергия» и «Зенит» на компонентах керосин и жидкий кислород с высоким уровнем тяги (806,4 тс тяги в пустоте) характеризуются значительными расходом компонентов топлива (2393 кг/с) и высоким давлением в камерах сгорания (24,5 МПа). Неизбежное возбуждение ударных волн при открытии или закрытии отсечных клапанов во время проведения испытаний ЖРД сопряжено с повреждением измерительной и управляющей арматуры протяженных магистралей заправки. Одним из основных средств борьбы с гидроударными волнами является установка в магистралах демпферов и других устройств, снижающих энергию ударных возмущений [1–7]. Однако всегда остается открытым вопрос влияния волновых возмущений в магистралах на режим горения в камере ЖРД и, как следствие, возможное возбуждение неустойчивости горения [5; 8].

Из экспериментов на магистралах стендовой системы и теоретически определено, что в случае отсутствия потока ламинарная модель движения жидкости вполне удовлетворительно описывает акустические характеристики тракта в широком диапазоне частот вплоть до пятого резонанса продольных колебаний [1; 2; 9; 10]. Для трактов относительно малой длины ( $L/D < 200-300$ ) эффектом затухания волновых возмущений при расчётах процессов, протекающих в них, можно пренебречь. Данных об экспериментальных исследованиях распространения волновых возмущений в протяженных трактах (где отношение диаметра к длине 1:1000 и более) в известных публикациях нет. В то же время влияние единичных гидро-

ударных волн и волновых процессов на характеристики турбулентных течений в протяженных трактах являются важным аспектом при построении физико-математических моделей систем питания мощных жидкостных ракетных двигателей [1; 2; 6; 7; 11], а также при моделировании течений и режимов работы магистральных трубопроводов и других задач машиностроения.

Исследование затухания колебаний гидроакустической волны в протяжённых круглых трактах осложнено трудоёмкостью создания экспериментальной установки необходимого масштаба. Именно по этой причине отсутствуют экспериментальные работы, посвященные исследованию процессов затухания волновых возмущений при их распространении в трубах с большим соотношением длины к диаметру. Можно разработать физико-математическую модель распространения волн в турбулентном жидкостном потоке, основываясь на известных классических работах Н. Е. Жуковского [12], Г. Шлихтинга по теории пограничного слоя [13], И. А. Чарного по турбулентным течениям в трубах [14]. Данные для коэффициента трения при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкости в гладких каналах можно получить из работ Блазиуса, Халанда, Свами [15] и др. Однако достоверность результатов численных расчетов может быть подтверждена только эмпирическим путем. Учитывая практическую направленность работы, целью настоящего исследования является создание инженерной методики расчета затухания ударных возмущений и вынужденных колебаний в жидкостных турбулентных потоках.

**Квазистационарное решение.** Определение параметров гидроударной волны и показателя её затухания

дал Н. Е. Жуковский в своей работе «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах» [12]. Аналитическое решение для коэффициента затухания волны в круглом тракте, полученное из предположения квазистационарности течения, было опубликовано в работе И. А. Чарного в 1975 г. Он, решая задачу распространения волны, использовал метод уравнений характеристик [14]. Представив уравнения для стационарного течения и возмущенного потока, он получил соотношение, связывающее изменение скорости  $u$  с пройденной волной расстояния  $x$ :

$$\frac{x}{4aD} = \int_{u_1}^u \frac{du}{\lambda_0 u_0 |u_0 - \lambda| - \lambda u |u|}, \quad (1)$$

где  $a$  – скорость звука в жидкости;  $D$  – внутренний диаметр круглого тракта;  $\lambda_0, \lambda$  – коэффициенты трения стационарного и возмущенного течения;  $u_1$  – скорость распространения волны возмущения в сечении  $x = 0$ ;  $u$  – скорость распространения волны возмущения при  $x > 0$ ;  $u_0$  – стационарная скорость течения до внесения возмущения в сечении  $x$ .

Коэффициент трения  $\lambda$  появляется при переходе от двумерного течения к одномерному, когда уже нельзя связать напряжения вязкого трения с изменением профиля скорости. В этом случае гидравлические потери давления из-за трения связывают с изменением скорости эмпирическими зависимостями типа уравнения Блазиуса. В то же время известно, что влияние сил трения жидкости о стенки гидравлического тракта зависит от частоты [12]. Используя безразмерные вариации скорости и давления в виде отношения возмущений скорости и давления  $\delta u'$  и  $\delta p'$  к их средним стационарным значениям  $\delta u = \frac{\delta u'}{u_{cp}}$ ,  $\delta p = \frac{\delta p'}{p_{cp}}$ , а также

безразмерных времени  $\bar{t} = \frac{t}{(l/a)}$  и координаты

$\bar{x} = \frac{x}{l}$ , уравнения движения жидкости в малых отклонениях можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{\rho u a}{p_{cp}} \frac{\partial \delta u}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \delta p}{\partial \bar{x}} + \frac{\Delta p}{p_{cp}} \delta u &= 0; \\ \frac{\partial \delta p}{\partial \bar{t}} + \frac{\rho u a}{p_{cp}} \frac{\partial \delta u}{\partial \bar{x}} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta p$  – гидравлические потери давления из-за вязкого трения в тракте.

В работе [2] рассмотрен пример распространения возмущений вдоль магистрали. Решая данное уравнение для гармонических колебаний частоты  $\omega$  (безразмерный параметр частоты  $\bar{\omega} = \frac{\omega l}{a}$ ):

$$\begin{aligned} \delta p &= \delta \tilde{p}_0 e^{i\bar{\omega} \bar{t}}; \\ \delta u &= \delta \tilde{u}_0 e^{i\bar{\omega} \bar{t}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta \tilde{p}_0$  и  $\delta \tilde{u}_0$  – амплитуды вынужденных колебаний давления и скорости, и получено решение в виде

$$\frac{d^2 \delta \bar{u}}{d\bar{x}^2} + \left( \bar{\omega}^2 - i\bar{\omega} \frac{\Delta p}{\rho u a} \right) \delta \bar{u} = 0. \quad (4)$$

Член в скобках формулы (4) является волновым числом  $k^2 = \bar{\omega}^2 - i\bar{\omega} \frac{\Delta p}{\rho u a}$ . При относительно малом гидравлическом сопротивлении и достаточно большой частоте выполняется условие  $\bar{\omega} \frac{\Delta p}{\rho u a} \ll \bar{\omega}^2$ , тогда при решении уравнения (4) вторым слагаемым в волновом числе  $k$  можно пренебречь. В полученном решении возмущения давления и скорости при их распространении вдоль тракта зависят от координаты и времени

$$\delta p = \frac{\rho u a}{\Delta p} \frac{k}{\bar{\omega}} \left[ A \exp i(\bar{\omega} \bar{t} - k \bar{x}) - B \exp i(\bar{\omega} \bar{t} + k \bar{x}) \right]. \quad (5)$$

Уравнение (5) описывает распространение волн постоянной формы от источника в разные стороны трубы. Первое слагаемое в квадратных скобках описывает распространение возмущения в прямом направлении, а второе – в обратном. Постоянные  $A$  и  $B$  зависят от исходного сигнала возмущения. На практике мы чаще встречаемся с эффектом затухания возмущения, т. е. когда влиянием сил вязкого трения пренебрегать нельзя. В этом случае обе составляющие волнового числа являются соизмеримыми величинами, а решение уравнения (4) приобретает несколько другую форму, в которой появляется дополнительный множитель  $\exp[-\text{Im}(k)\bar{x}]$ . Для гармонических колебаний, распространяющихся в прямом направлении, возмущения давления записываются следующим образом:

$$\delta p = A \exp i(\bar{\omega} \bar{t} - k \bar{x}) \exp[\text{Im}(k)\bar{x}]. \quad (6)$$

Мнимая часть комплексного волнового числа является коэффициентом затухания  $\text{Im}(k) = \eta$ . Значение коэффициента  $A$  получим из граничных условий при  $x = 0$ , так как в этом случае возмущения равны колебаниям, возбуждаемым источником:  $A = \delta \tilde{p}_0$ .

В экспериментах показатель (декремент) затухания определяем как величину, обратную расстоянию, на котором амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз:

$$\eta = \frac{1}{x} \ln \frac{\delta \tilde{p}_0}{\delta p} = \frac{1}{x} \ln \frac{\delta \tilde{u}_0}{\delta u}. \quad (7)$$

Для гармонических колебаний в работе [2] аналитически было получено значение декремента затухания

$$\eta = \bar{\omega} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 4 \left( \frac{\Delta p}{\rho u a} \right)^2} - 1 \right]}. \quad (8)$$

Задачу определения коэффициента затухания для нестационарных течений в гидравлической магистрали можно решить аналитически лишь при специальных допущениях [14]. В общем случае необходимо выполнить точную математическую модель в частных производных и решить полученную систему уравнений численными методами.

В данной работе мы экспериментально исследовали затухание возмущений в узком диапазоне частот от 1 до 10 Гц и определяли зависимость коэффициента затухания от параметров течения в длинной магистрали.

**Эксперимент.** Волновые колебания в трубе – это распространяющиеся возмущения давления и скорости, которые связаны между собой известной формулой Н. Е. Жуковского. Поскольку измерение скорости потока технологически сложнее измерения давления, то в экспериментах регистрировались стационарные значения давления и пульсации давления равномерно расположенными вдоль трубы датчиками. При длинах трактов в несколько десятков километров, применительно к задачам транспортировки углеводородных топлив по магистральным трубопроводам, точки измерения контролируемых параметров устанавливались на расстоянии 10–20 км в зависимости от длины исследуемого трубопровода. Аналоговый сигнал датчика давления подавался на вход контроллера сбора, обработки информации и преобразовывался АЦП контроллера в цифровой сигнал. Оцифрованный сигнал фиксировался в оперативной памяти устройства, упаковывался и передавался на сервер базы данных, где были собраны в единую базу данных сигналы от всех точек измерений.

При анализе процессов распространения одиночной гидроударной волны в турбулентном потоке тракта мы столкнулись с задачей выделения полезного сигнала (волнового фронта) на фоне постоянного гидродинамического шума. Сам по себе гидродинамический шум представляет собой колебания различных частот, создаваемых работой насосных агрегатов и прочего технологического оборудования. Обработка сигнала, в котором содержится только гидро-

намический шум, можно наблюдать за процессами затухания волновых возмущений в широком спектре частот. В экспериментах инициировалась одиночная ударная волна с амплитудой более чем в 2 раза большей уровня постоянного гидродинамического шума. Гидроударные волны создавались путем отбора жидкости. При этом в ответ на открытие крана (начало отбора) генерировалась волна разрежения, а на закрытие – волна сжатия (рис. 1).

Эксперименты проводились на магистральных трубопроводах круглого сечения, осуществляющих постоянную перекачку углеводородных топлив. Физические характеристики перекачиваемой жидкости и параметры течения по каждому объекту представлены в таблице.

Проведённый спектральный анализ сигнала, измеренный преобразователем избыточного давления ТЖИУ 406, установленным на расстоянии  $4 \cdot 10^4 D_y$ , показал, что основная часть спектра гидродинамических колебаний находится в частотном диапазоне до 10 Гц (рис. 2). Высокие частоты, генерируемые работой насосных агрегатов, успевают затухать на расстоянии  $4 \cdot 10^4 D_y$ .

Измеряя амплитуду единичных гидроударных волн, а также и общий уровень гидродинамического шума, состоящего из колебаний частотой до 10 Гц, были получены идентичные картины затухания. Для каждого экспериментального образца протяженного тракта проводилась серия экспериментов по определению снижения пика давления волновых возмущений. Для этого строились кривые зависимости величины амплитуды гидроударной волны  $\delta p$  от расстояния (рис. 3).

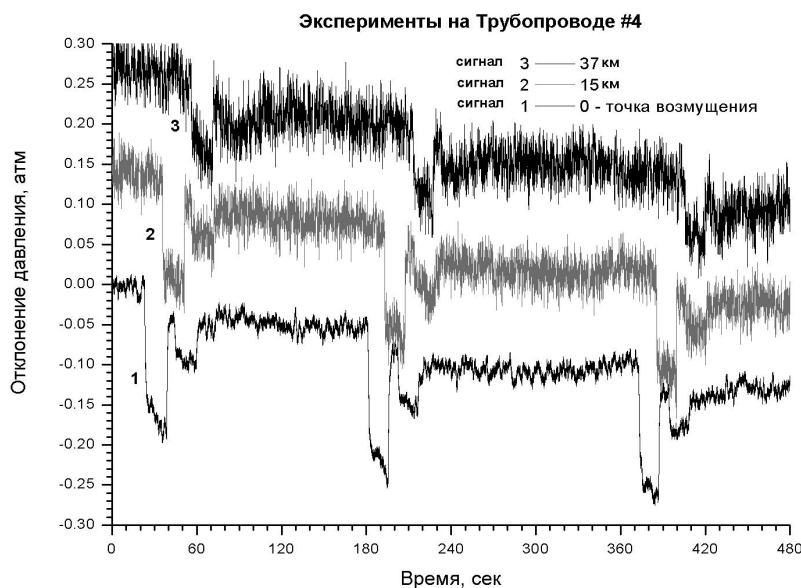


Рис. 1. Измеренные сигналы преобразователей давления, приведённые к отклонениям вблизи 0 вычитанием постоянной составляющей

Характеристики исследуемых объектов

№ п/п	Длина, км	Диаметр, м	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Эффективная вязкость, сСт	Скорость течения, м/с	Скорость звука, км/с	Число Рейнольдса (Re), 10 <sup>5</sup>
1	290	1	872,3	21	0,442	1,040	0,21
2.1	23	0,8	864,8	13,4	0,665	1,118	0,39
2.2					1,744	1,103	1,04
3	170	0,5	848	1	1,381	1,161	7,21
4	40	0,5	839,7	2	2,235	1,123	5,47
5	227	0,5	844	6	0,849	1,150	0,85
6	259	1	879	18	1,75	1,060	0,95

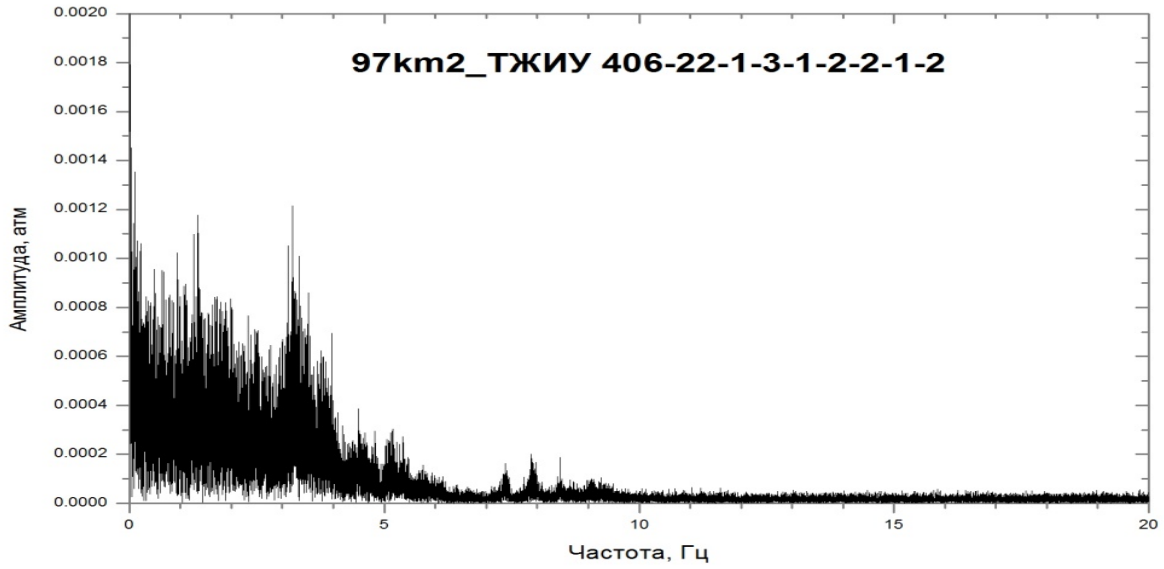


Рис. 2. Типичный спектр гидродинамического шума в тракте, записанный преобразователем

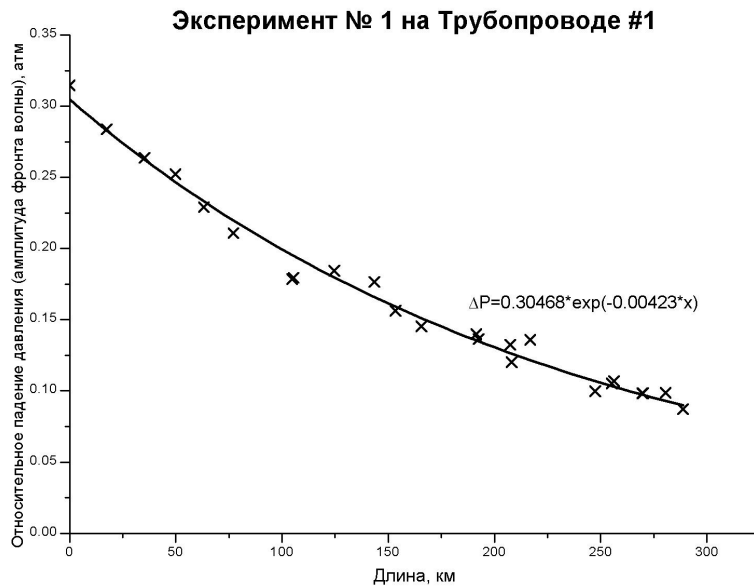


Рис. 3. Процесс затухания одиночной гидроударной волны

Следуя формуле (7), для каждого эксперимента набор точек был аппроксимирован при помощи стандартных функций математического программного обеспечения функцией вида  $f(x) = A \exp(bx)$ . Значения коэффициента  $b$  являются показателем (декрементом) затухания гидроударной волны. Очевидно, что затухание волновых процессов в турбулентном потоке происходит в основном благодаря силам вязкого трения. Отношение сил трения к силам инерции потока характеризуется числом Рейнольдса. В этой связи представляется целесообразным определять величину декремента затухания одиночной волны в зависимости от числа Рейнольдса:

$$\eta = f(\text{Re}) = f\left(\frac{u_0 D_y}{\nu}\right), \quad (9)$$

где  $D_y = \text{const}$  – внутренний диаметр исследуемого тракта;  $u_0$  – скорость течения принималась постоянной и равной среднему значению скорости;  $\nu$  – вязкость перекачиваемого продукта.

Вычислялась эффективная вязкость по формуле Блазиуса, исходя из уравнения потерь давления на трение на исследуемом участке на стационарном режиме, как

$$\Delta p = 0,3164 \text{Re}^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{l}{D_y} \frac{\rho u_0^2}{2}. \quad (10)$$

На основе обработанных данных всех экспериментов был построен график зависимости коэффициента затухания  $\eta$  от безразмерного параметра  $\text{Re}$ . Результаты каждой серии экспериментов были обобщены и получено одно среднее значение коэффициента затухания  $\eta$  для каждой серии. Полученные экспериментальные значения коэффициента затухания приведены на рис. 4.

При малых числах Рейнольдса  $\text{Re} \ll 10^5$  течение в пограничном слое становится ламинарным [3] и функция затухания стремится к постоянной величине  $\eta_0$ , которая может быть вычислена при помощи формулы Стокса для закона трения. Постоянная величина коэффициента волнового затухания в ламинарном потоке равна

$$\eta_0 = \frac{16\nu}{D_y^2 a}. \quad (11)$$

При распространении возмущений в потоках при больших числах Рейнольдса динамические изменения происходят внутри ламинарного подслоя. Дальнейшее увеличение числа Рейнольдса не приводит к уменьшению ламинарного подслоя и, следовательно, не даёт изменений в коэффициенте затухания, и в результате он остаётся постоянным и стремится к постоянной величине. Таким образом, искомая функция имеет асимптоту  $\eta = a$  при больших числах Рейнольдса. На основании сделанных предположений экспериментальные точки были аппроксимированы кривой вида

$$y = \eta_0 + A[1 - \exp(-Bx)].$$

По результатам проведенной обработки были получены следующие значения для коэффициентов:  $A = 2 \cdot 10^5$ ;  $B = 10^{-5}$ .

Запишем полученную зависимость в следующем виде:

$$\eta = \eta_0 + \frac{1}{\beta} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\text{Re}}{\text{Re}_{\text{кр}}}\right) \right], \quad (12)$$

где  $\beta = 47,32 \pm 0,32 = 47,3$  км – расстояние, на котором сигнал гидроударной волны затухает в  $e$  раз в турбулентном пограничном слое, а коэффициент  $\beta$  зависит от толщины ламинарного подслоя, который в свою очередь является функцией от шероховатости стенки магистрали;  $\text{Re}_{\text{кр}} = (0,897 \pm 0,022) \cdot 10^5 \sim 10^5$  – критическое значение числа Рейнольдса, при котором толщина ламинарного подслоя вблизи поверхности трубы становится менее 1 % от диаметра тракта, при этом дальнейший рост потерь из-за вязкого трения постепенно уменьшается, а коэффициент затухания выходит на постоянную величину  $\frac{1}{\beta}$ .

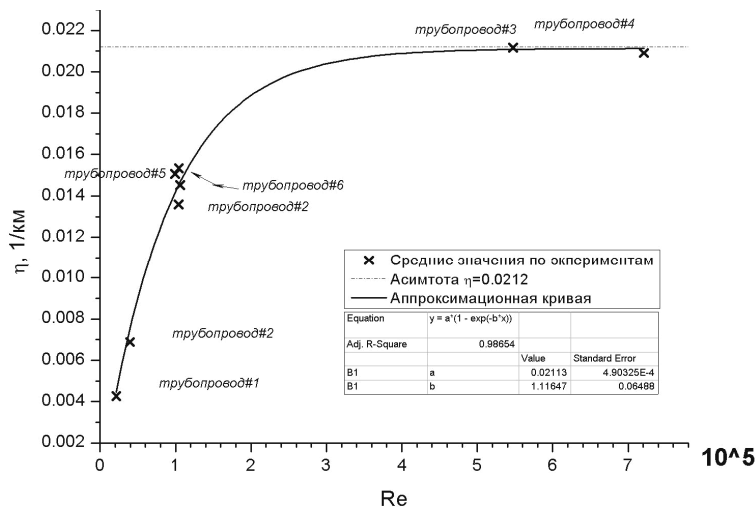


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания от безразмерного числа Рейнольдса

Предложенная эмпирическая зависимость позволяет проводить простую оценку затухания колебательных процессов и одиночных гидроударных волн, распространяющихся вдоль протяженного тракта круглого сечения.

Проведённые на следующем шаге исследования сравнения результатов полученной зависимости с теоретическими расчетами распространения возмущений, полученных вычислительными методами, показали, что наибольшая сходимость эксперимента и теории наблюдается в области малых значений числа Рейнольдса. В области больших значений Re результаты теоретических расчетов расходятся с экспериментом: затухание за счет вязкого трения в эксперименте больше рассчитанных значений.

Колебательный процесс состоит из «разгонных» волн сжатия и «тормозящих» волн разрежения. Проведенные серии экспериментов содержали исследования распространения и затухания волн обоих типов. Результаты экспериментов (рис. 5) подтвердили теоретические предположения, полученные У. Р. Лийвом в 1983 г. [15]: экспериментальные значения коэффициента затухания волны разрежения значительно меньше коэффициента затухания волны сжатия.

Например, для трубопровода № 3, результаты которого приведены на рис. 5, эта разница составила 0,009 1/км, т. е. затухание волн при торможении потока почти в 2 раза больше чем при разгоне.

На рис. 6, а приведено изображение распределения скорости потока по сечению магистрали в случае отсутствия волны давления. При распространении волны сжатия, т. е. при разгоне потока, профиль течения на фронте волны вытягивается (рис. 6, б).

В этом случае при  $u_1 > u_0 > 0$  либо при  $u_1 < u_0 < 0$  проинтегрированное уравнение (1) в предположении равенства значения  $\lambda = \lambda_0 = \text{const}$ :

$$\eta_2^p = \frac{\lambda_0 |u_0|}{2aD_y} + \frac{1}{x} \ln \left[ 1 + \frac{\Delta p_0}{2\rho c u_0} \left( 1 - e^{-\frac{\lambda_0 |u_0| x}{2aD_y}} \right) \right]. \quad (13)$$

При торможении потока (рис. 6, в) при  $u_1 > u_0 > 0$ , а также и при  $u_1 < u_0 < 0$ , решение того же уравнения принимает вид

$$\eta_2^T = \frac{\lambda_0 |u_0|}{2aD_y} + \frac{1}{x} \ln \left[ 1 - \frac{\Delta p_0}{2\rho c u_0} \left( 1 - e^{-\frac{\lambda_0 |u_0| x}{2aD_y}} \right) \right]. \quad (14)$$

Из сравнения полученных формул видно, что  $\eta_2^T < \eta_2^p$ , т. е. при одинаковых по модулю величинах скорости потока коэффициент затухания при разгоне потока будет больше, чем при торможении. При разгоне потока градиент скорости вблизи стенок трубопровода увеличивается, следовательно, потери на вязкое трение увеличиваются (рис. 6, б). При торможении потока профиль скорости становится таким, как изображенный на рис. 6, в, градиент скорости уменьшается, а с ним и потери на трение также уменьшаются.

**Заключение.** В результате проведенных экспериментальных исследований по затуханию ударных гидравлических волн на протяженных магистралях получены эмпирические соотношения показателя затухания в виде функциональной зависимости от критерия Рейнольдса.

Определено, что гармонические составляющие широкополостного спектра импульсного возмущения в турбулентном жидкостном потоке с частотой более 10 Гц при распространении в магистрали быстро затухают и несут существенны. Увеличение показателя затухания низкочастотных составляющих спектра возмущения существенным образом определяется вязкостью и гидравлическими потерями и обратно пропорционально связано с волновыми свойствами среды и диаметром трубопровода. Найденные соотношения, описывающие затухание гидроударных волн в турбулентных потоках, используются при проведении инженерных расчетов систем питания жидкостных ракетных двигателей на кафедре ракетных двигателей в Московском авиационном институте.

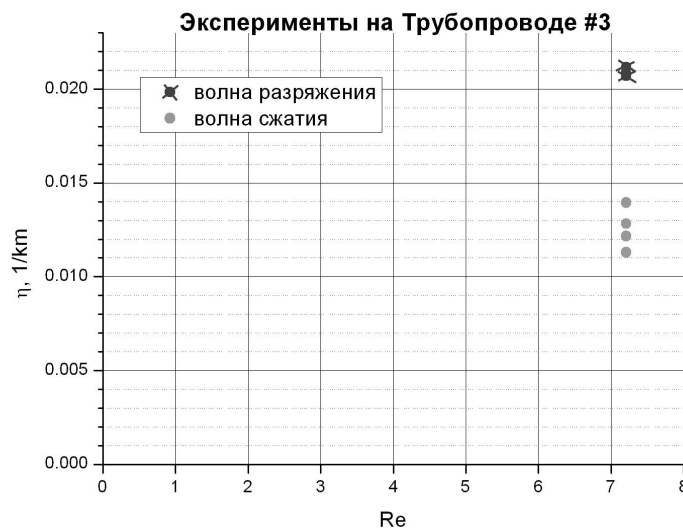


Рис. 5. Различие коэффициентов затухания гидроударной волны сжатия и разрежения

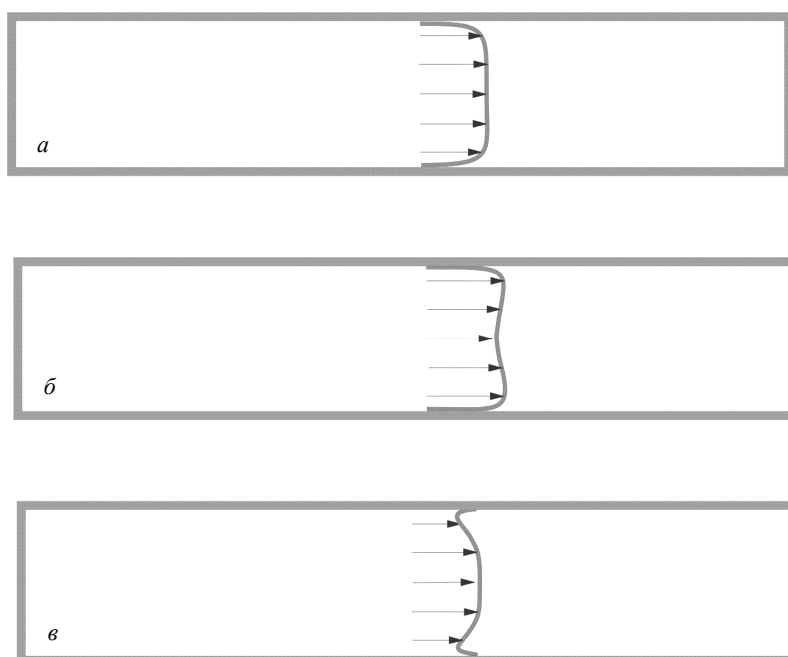


Рис. 6. Изменение профиля скорости на фронте волны

Полученные зависимости будут полезны для оценок воздействия гидроударных волн на агрегаты, арматуру и трубопроводы при проведении приемосдаточных испытаний (КТИ) и других видов испытаний жидкостных ракетных двигателей на предприятиях, занимающихся их разработкой и изготовлением.

#### Библиографические ссылки

1. Гликман Б. Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1974. 296 с.
2. Гликман Б. Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях. М. : Машиностроение, 1979. 253 с.
3. Ламб Г. Гидродинамика. М. : Гостехиздат, 1947. 929 с.
4. Пухов В. А., Чучеров А. И. Стендовые огневые испытания ЖРД. М. : Машиностроение, 1971. 543 с.
5. Неустойчивость горения в ЖРД / под ред. Д. Т. Харрье, Ф. Г. Рирдона. М. : Мир, 1975. 870 с.
6. Махин В. А., Присняков В. Ф., Белик Н. П. Динамика жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1974. 833 с.
7. Мошкин Е. К. Нестационарные режимы работы ЖРД. М. : Машиностроение, 1970. 336 с.
8. Бирюков В. И., Козлов А. А. Внутрикамерная низкочастотная неустойчивость рабочего процесса в дросселируемых ЖРД. М. : МАИ-ПРИНТ, 2007. 384 с.
9. Бирюков В. И., Мосолов С. В. Акустика газовых трактов жидкостных ракетных двигателей. М. : Изд-во МАИ, 2013. 164 с.
10. Экспериментальное исследование акустических характеристик столба жидкости в непроточных трубах / Е. Д. Барбашов [и др.] // Акустический журнал. 1996. Т. 42, № 4. С. 478–488.
11. Беляев Е. Н., Черваков В. В. Математическое моделирование ЖРД. М. : МАИ\_ПРИНТ, 2009. 280 с.

12. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М. ; Л. : Гостехиздат, 1949. 103 с.

13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 713 с.

14. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Недра, 1975. С. 186–191.

15. Лийв У. Р. Теоретические и экспериментальные основы расчета напорного ускоренного движения жидкости в цилиндрических трубах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.09. Л., 1983. 48 с.

#### References

1. Glikman B. F. *Avtomaticheskoe regulirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Automatic control of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 296 p.
2. Glikman B. F. *Nestatsionarnye techeniya v pnevmogidravlicheskih tsepyakh* [Non-stationary currents in pneumatichydraulic chains]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 253 p.
3. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1947, 929 p.
4. Pukhov V. A., Chuchеров A. I. *Stendovye ognevye ispytaniya ZhRD* [Bench fire tests LPR]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971, 543 p.
5. *Neustoychivost' goreniya v ZhRD* [Liquid Propellant Rocket Combustion Instability]. Editor D. T. Xarrje, ass. edit. F. H. Reardon]. Moscow, Mir Publ., 1975, 870 p.
6. Makhin V. A., Prisnyakov V. F., Belik N. P. *Dinamika zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Dynamics of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 833 p.
7. Moshkin E. K. *Nestatsionarnye rezhimy raboty ZhRD* [Non-stationary operating modes LPR]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 336 p.



8. Biryukov V. I., Kozlov A. A. *Vnutrikamernaya nizkochastotnaya neustoychivost' rabocheho protsessa v drosseliruemyykh ZhRD* [Intrachamber low-frequency instability of working process in throttled LPR], Moscow, MAI-PRINT Publ., 2007, 384 p.
9. Biryukov V. I., Mosolov S. V. *Akustika gazovykh traktov zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Acoustics of gas paths of liquid rocket engines], Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2013, 164 p.
10. Barbashov E. D., Glikman B. F., Kazakov A. A., Morozov S. A. [Experimental research of acoustic characteristics of a column of a liquid in landlocked pipes], *Akusticheskiy zhurnal*, 1996, Vol. 42, No.4, P. 478–488 (In Russ.).
11. Belyaev E. N., Chervakov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie ZhRD* [Mathematical modeling LPR], Moscow, MAI-PRINT Publ., 2009, 280 p.
12. Zhukovskiy N. E. *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh* [About hydraulic blow in water pipes]. M.–L., Gostekhizdat Publ., 1949, 103 p.
13. Shlikhting G. *Teoriya pogrannichnogo sloya* [The interface theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 713 p.
14. Charnyy I. A. *Neustanovivsheesya dvizhenie real'noy zhidkosti v trubakh* [Unsteady movement of a real liquid in pipes]. Moscow, Nedra Publ., 1975, P. 186–191.
15. Liyv U. R. *Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy rascheta napornogo uskorennoho dvizheniya zhidkosti v tsilindricheskikh trubakh. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk.* [Theoretical and experimental bases of calculation of the pressure head accelerated movement of a liquid in cylindrical pipes. Dr. techn. sci. diss. author's abstr.], Leningrad, 1983, 48 p. (In Russ.).