

КОЭФФИЦИЕНТ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПРОТЯЖЕННОГО ТРУБОПРОВОДА

© 2009 г. С. А. Барабанов, Б. Ф. Гликман

ООО "ЭнергоАвтоматика"

125438 Москва, а/я 98

E-mail: Barabanov.Sergey@gmail.com

Поступила в редакцию 12.02.08 г.

Приводятся результаты экспериментов по измерению коэффициента затухания акустической волны в протяженных магистральных трубопроводах нефти и нефтепродуктов. Проводится сравнение и анализ теории с результатами экспериментов. Предлагается аппроксимационная зависимость коэффициента затухания как функции от некоторого безразмерного параметра

PACS: 43.30.Es, 43.20.Mv

ВВЕДЕНИЕ

Применительно к распространению в трубах небольшой длины установившихся гармонических акустических колебаний экспериментально и теоретически показано, что в случае отсутствия потока ламинарная модель движения жидкости вполне удовлетворительно описывает акустические характеристики тракта в широком диапазоне частот — до пятого резонанса продольных колебаний [1].

Для трубопроводов с турбулентным движением жидкости в диапазоне круговых частот 600–1200 Гц, коэффициента вязкости $\nu = 10^{-6}$ м²/с и скорости потока 0.8–5 м/с расчеты показали [2], что динамический слой у стенки (глубина проникновения возмущений) оказался близким к толщине ламинарного подслоя. В этом случае можно пренебречь турбулентной вязкостью и расчет трения при колебаниях проводят по ламинарной модели пограничного слоя. Эксперименты подтвердили эффективность упрощенной модели турбулентного колеблющегося потока в диапазоне двух первых резонансов акустических продольных колебаний [2].

Для газа экспериментальные исследования акустических характеристик тракта для продольных и поперечных колебаний исследованы в работе [3], при этом на выходе тракта было установлено сопло со сверхкритическим перепадом, трение вообще не учитывалось.

Для движения одиночной волны разряжения или заброса давления в длинной трубе (длиной десятки и сотни километров) с учетом трения никаких экспериментальных данных найти не удалось.

В то же время определение коэффициента затухания акустической волны в протяженных трубопроводах становится крайне важной задачей в последнее время. На принципе регистрации акустических возмущений работают многие современные методы диагностики состояний магистральных нефте-, газо- и продуктопроводов [5]. Кроме того, решение задачи необходимо для расчетов волн гидроудара, распространяющихся в системах водоснабжения.

Исследование затухания акустической волны в протяженных трубопроводах осложнено трудоемкостью проведения экспериментов. Именно по этой причине до настоящего времени отсутствовало какое-либо практическое рассмотрение вопроса затухания волны при распространении ее на большие расстояния в трубопроводах. Теоретическое решение задачи уже было получено до нас, и мы в своей статье на нем остановимся, и далее проведем анализ и сравнения экспериментальных данных с результатами теоретического расчета.

Очевидно, что коэффициент затухания акустической волны зависит от многих параметров и свойств системы, описать которые в реальных условиях является очень дорогостоящей и объемной задачей. Необходимо получить инструмент, позволяющий быстро и легко оценить величину коэффициента затухания. Возможность получения очень ценных экспериментальных данных, позволило нам провести эту оценку.

КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ РЕШЕНИЕ

Возможно, экспериментальные исследования затухания акустических волн в трубопроводах ра-

нее не проводились еще и потому, что не имели большого прикладного значения. В трактах малой длины эффектом затухания волн при расчетах процессов протекающих в них пренебрегали, а расчеты для протяженных трубопроводов ограничивались оценкой амплитуды волны гидроудара, определение величины которой дал Н.Е. Жуковский [7] в начале 20 века.

Так как для нестационарного турбулентного течения не существует соотношения для напряжения вязкого трения в зависимости от скорости и параметров турбулентности, в гидродинамике применяется предположение о квазистационарности параметров течения, в частности трения. В этом случае принимается, что напряжение трения в нестационарном течении в каждый момент совпадает с напряжением трения в том же сечении при такой же мгновенной средней скорости в стационарном потоке.

О том, что акустическая волна в трубопроводе затухает, знали, конечно, давно. Аналитическое решение для коэффициента затухания волны в трубопроводе, полученное из предположения квазистационарности течения, было опубликовано в работе И.А. Чарного в 1975 г. Он, решая задачу распространения волны, использовал метод уравнений характеристик [6]. Записав разницу уравнений характеристик до возникновения акустической волны и возмущенного потока, он получил соотношение, связывающее изменение скорости u с пройденной волной расстояния x :

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

где

c — скорость звука в жидкости,

D — диаметр трубы,

λ_0, λ — коэффициенты трения соответственно до и после возмущения,

u_1 — скорость после возмущения в точке $x = 0$,

u — скорость после возмущения в точке x ,

u_0 — скорость до возмущения в точке x .

Коэффициент трения λ появляется при переходе от двумерного течения к одномерному, когда уже нельзя связать напряжения вязкого трения с изменением профиля скорости. В этом случае потери давления на трение связывают с изменением скорости эмпирическими зависимостями типа уравнения Блазиуса (см. ниже формулу (6)). В то же время известно, что напряжение трения в нестационарном течении, в частности, в пульсирующем потоке, сильно зависит от частоты [7].

Коэффициентом затухания называют величину, обратную расстоянию, на котором амплитуда волны уменьшается в e раз:

$$\eta = \frac{1}{x} \ln \frac{\Delta P_0}{\Delta P} = \frac{1}{x} \ln \frac{\Delta u_0}{\Delta u}. \quad (2)$$

В общем виде задача нахождения коэффициента затухания даже для квазистационарного течения решается численными методами. В ряде некоторых частных случаев решение можно найти аналитически. Например, для линейного закона трения (ламинарное течение):

$$\frac{\lambda|u|}{2D} = \frac{\lambda_0|u_0|}{2D} = 2a = \text{const}. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в уравнение (1) и интегрируя его, получим уравнения вида (2), и, сравнивая их, получим:

$$\eta = \frac{a}{c} = \frac{\lambda_0|u_0|}{4cD}.$$

Для квадратичного закона трения в предположении, что $\lambda = \lambda_0 = \text{const}$, решаем уравнение (1). В результате получаем уравнение вида (4) для квазистационарной модели трения [2]:

$$\eta = \frac{\lambda_0|u_0|}{2cD} + \frac{1}{x} \ln \left\{ 1 - \frac{u_1 - u_0}{2u_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda_0|u_0|x}{2cD}\right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Для закона трения по Блазиусу в первом приближении находим коэффициент затухания, подставив в уравнение (1) $\lambda = 0.3164/\text{Re}^{0.25}$. Взяв первый значимый член в разложении Тейлора $u_0^{7/4}$ вблизи точки u_1 , получим:

$$\eta = \frac{7}{16} \frac{\lambda_0 u_0}{cD}. \quad (5)$$

Мы рассмотрели наиболее часто применяемые варианты допущений для оценок коэффициента затухания акустической волны в турбулентном потоке трубопровода.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Акустическая волна в трубопроводе — это распространяющееся возмущение давления и скорости, связанных между собой известной формулой Н.Е. Жуковского. Давление в трубопроводах измерялось в нескольких точках датчиками давления, расположенных на расстоянии 10–20 км. Аналоговый сигнал с датчиков в АЦП контролера преобразовывался в цифровой, запись которого производилась на диск (ОЗУ). Первым этапом обработки являлось расшифровка цифрового сигнала — перевод его обратно из единиц АЦП в физические величины.

Характеристики исследуемых объектов

	1	2	3	4	5	6	7
№ п/п	Длина, км	Диам., мм	Плотность, кг/м ³	Эффективная вязкость, сСт	Скорость течения, м/с	Скорость звука, км/с	Число Рейнольдса (Re), 10 ⁵
1	290	1000	872.3	21	0.442	1.040	0.21
2.1	23	800	864.8	13.4	0.665	1.118	0.39
2.2					1.744	1.103	1.04
3	170	500	848	1	1.381	1.161	7.21
4	40	500	839.7	2	2.235	1.123	5.47

При исследованиях распространения акустической волны в турбулентном потоке трубопровода мы столкнулись с задачей выделения ее сигнала на фоне постоянного гидродинамического шума.

Для обработки выбирались только записи экспериментов, где распространяющаяся акустическая волна имела ярко выраженный крутой фронт и большую амплитуду. Для создания возмущений, моделирующих образование утечки, в стенке трубопровода делались отводы относительно небольшого диаметра с запорным краном и дроссельными шайбами разного диаметра. Исследуемые возмущения являлись результатами процессов в трубопроводе: образование утечек, закрытие линейных задвижек, остановки и включения насосных агрегатов.

Эксперименты проводились только на линейных участках трубопроводов. Объектами исследования явились 4 протяженных участка магистральных нефте- и продуктопровода. Физические характеристики перекачиваемой жидкости и параметры течения по каждому объекту представлены в таблице 1.

Трубопровод 1

Проведена серия испытаний — имитации утечек различной продолжительности и скорости открытия крана путем слива жидкости через дроссельные шайбы различных диаметров. Из-за наличия большого уровня шума в трубопроводе во время проведения экспериментов для дальнейшего анализа подошли лишь 2 эксперимента, обладающих фронтом волны падения давления продолжительностью менее 2 сек.

На рисунке 1 изображен график, на котором видно, как возмущение вызванное утечкой на шайбе Ду 30 мм распространяется по трубопроводу и фиксируется датчиками давления в виде кратковременного падения давления. По оси ординат отложены отклонения давления, полученные путем вычитания постоянной составляющей давления из абсолютных показаний датчиков, чтобы привести графики к одному масштабу. Имитации утечек производились на конце трубопровода.

Трубопровод 2

Проведены две большие серии испытаний на максимальном и минимальном режимах работы трубопровода. В каждой серии создавались утечки на трех шайбах различного диаметра (12 мм, 15 мм, 20 мм).

Запись сигнала производилась в двух сечениях трубопровода (КП — контрольных пунктах) парой датчиков в каждой точке. Имитации утечек производились вблизи одной из точек измерений. Результаты представлены на рисунке 2.

Трубопровод 3

Исследуемые волновые процессы на трубопроводе 3 возникали в результате технологических работ проводимых на нем: частичное прикрытие линейных задвижек, остановки и включение насосных агрегатов.

На рисунках 3 и 4 изображено распространение возмущения — сигналы с датчиков давления. В эксперименте 5 на трубопроводе 3 (рис. 3) рассматривалось начальное резкое падение давления, произошедшее за 2 секунды.

В исследованиях использовались записи сигналов, возбужденных как от прикрытия задвижки, так и от переключения насосных агрегатов.

Трубопровод 4

Проведена серия экспериментов — имитация утечек с мгновенным открытием крана для слива жидкости через дроссельную шайбу Ду 13 мм. На рисунке 5 представлены результаты экспериментов — записи сигналов в трех точках регистрации давлений. Сигналы в точках 2 и 3 смещены на 0.15 и 0.30 атм соответственно для исключения наложения трендов сигналов друг на друга.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Определим, что такое акустическое возмущение, распространяющееся в трубопроводе. В нашем рассмотрении это резкое изменение скорости на фронте волны и связанного с ним изменение давления. Как показал Жуковский [7], для плоской волны в трубе изменение скорости и давления связаны формулой $P_1 - P_0 = \rho c(u_1 - u_2)$.

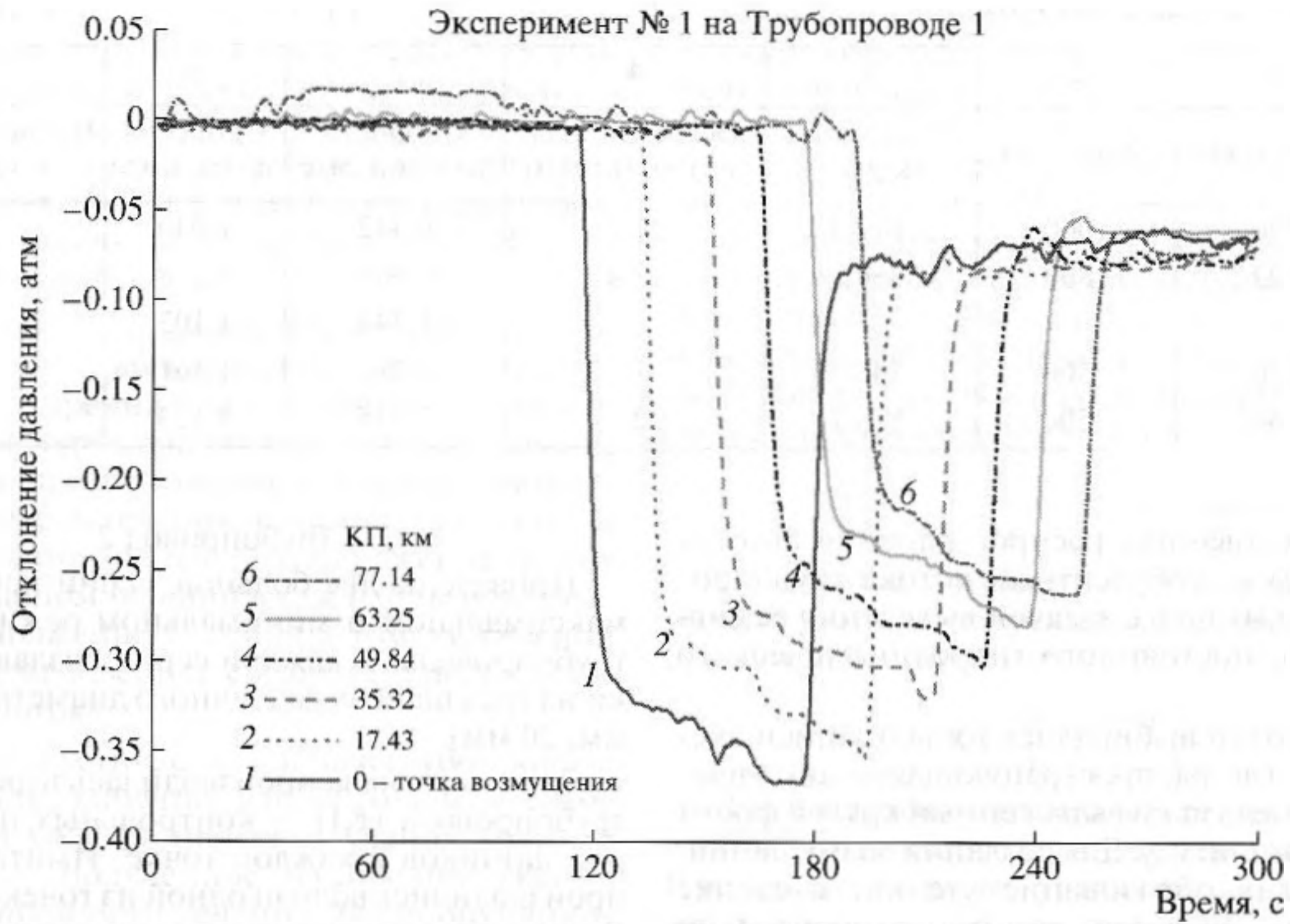


Рис. 1. Распространение возмущения, вызванного созданием утечки на шайбе Ду 30 мм.

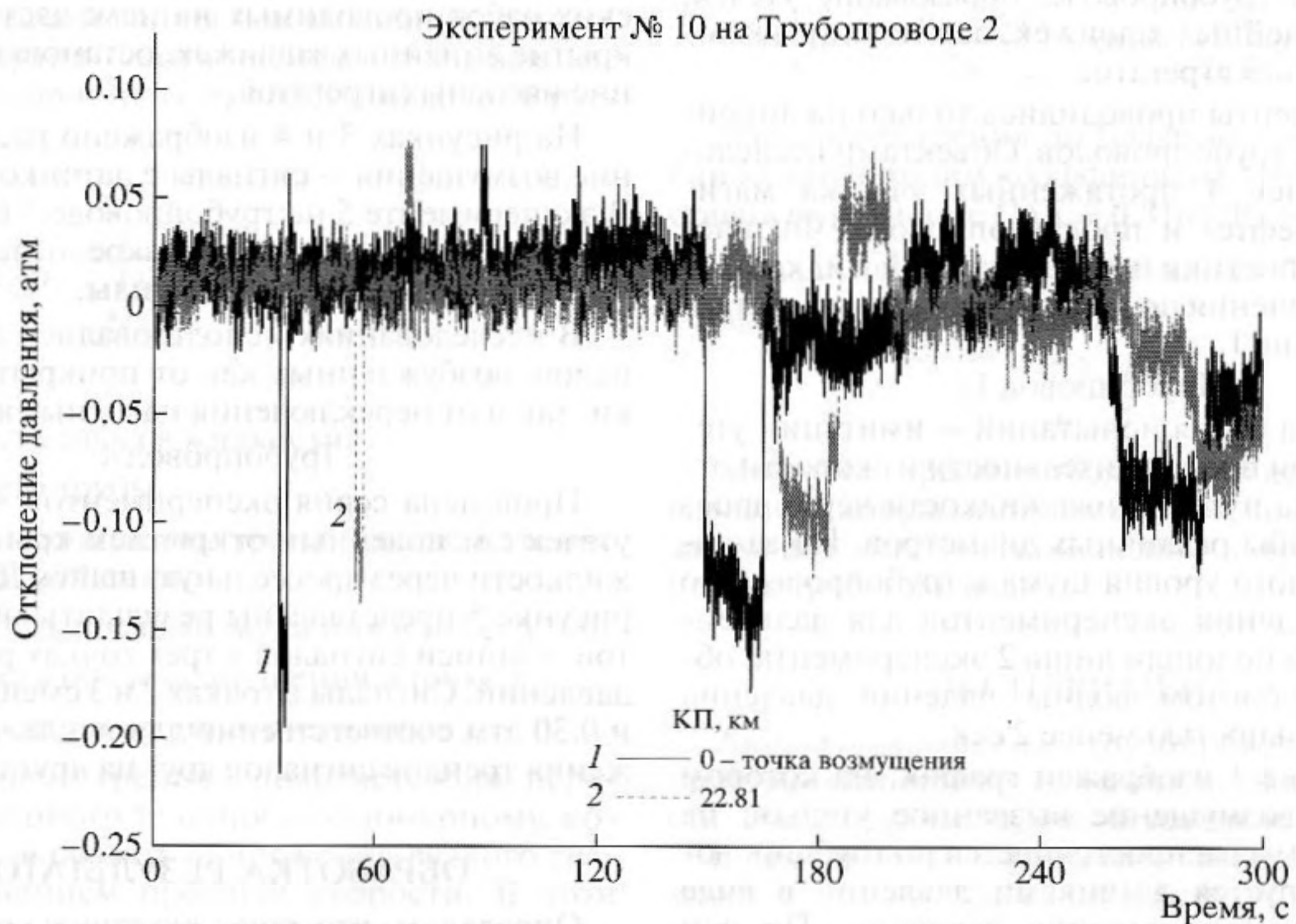


Рис. 2. Распространение возмущения, генерированного утечкой на шайбе Ду 20 мм.

Для исследования затухания волны в трубопроводе достаточно изучить поведение одного из параметров. Более удобным для исследования яв-

ляется скачок давления. Именно изменение его величины по мере распространения мы и будем изучать.

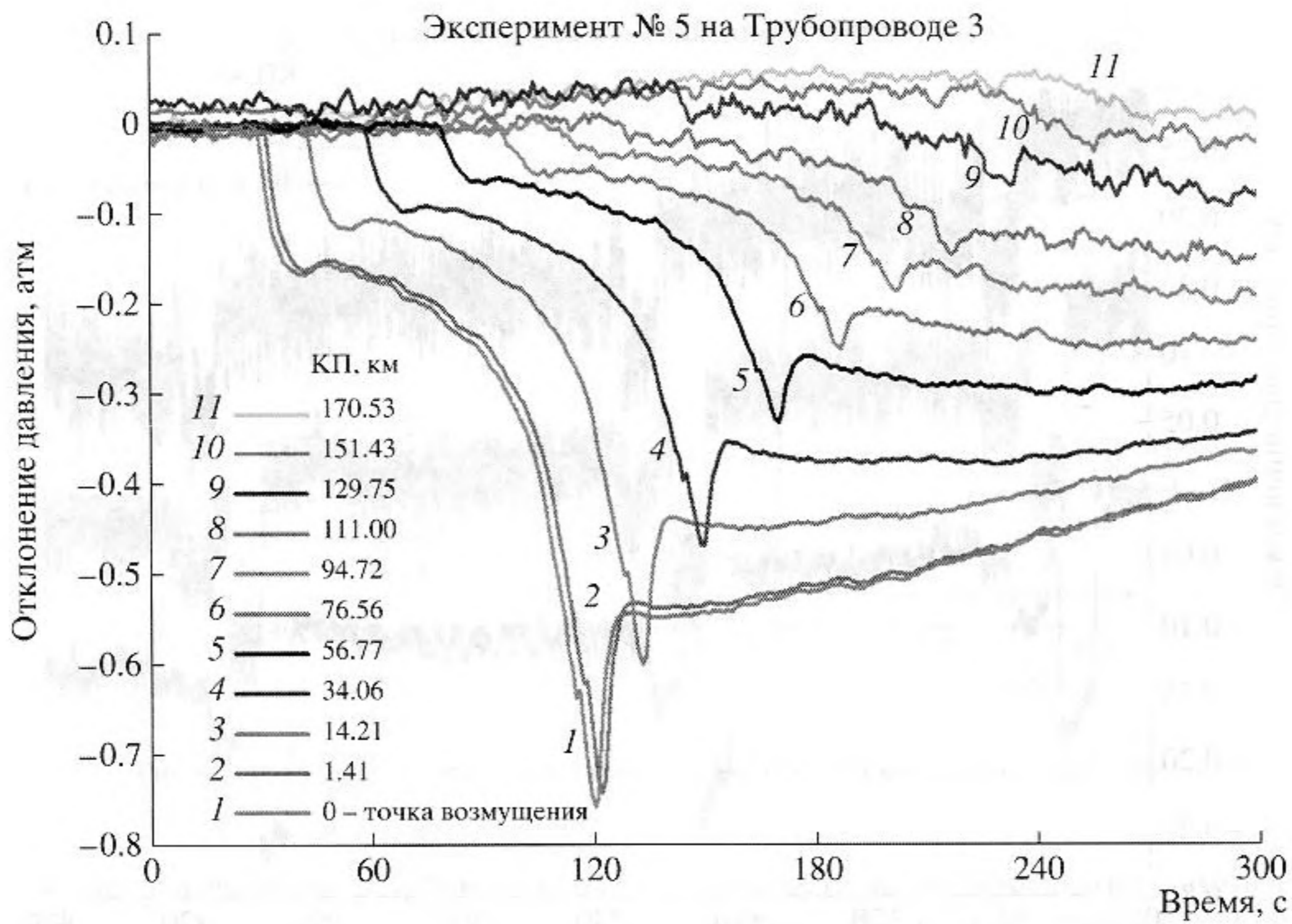


Рис. 3. Распространение возмущения, генерированного отключением насосного агрегата.

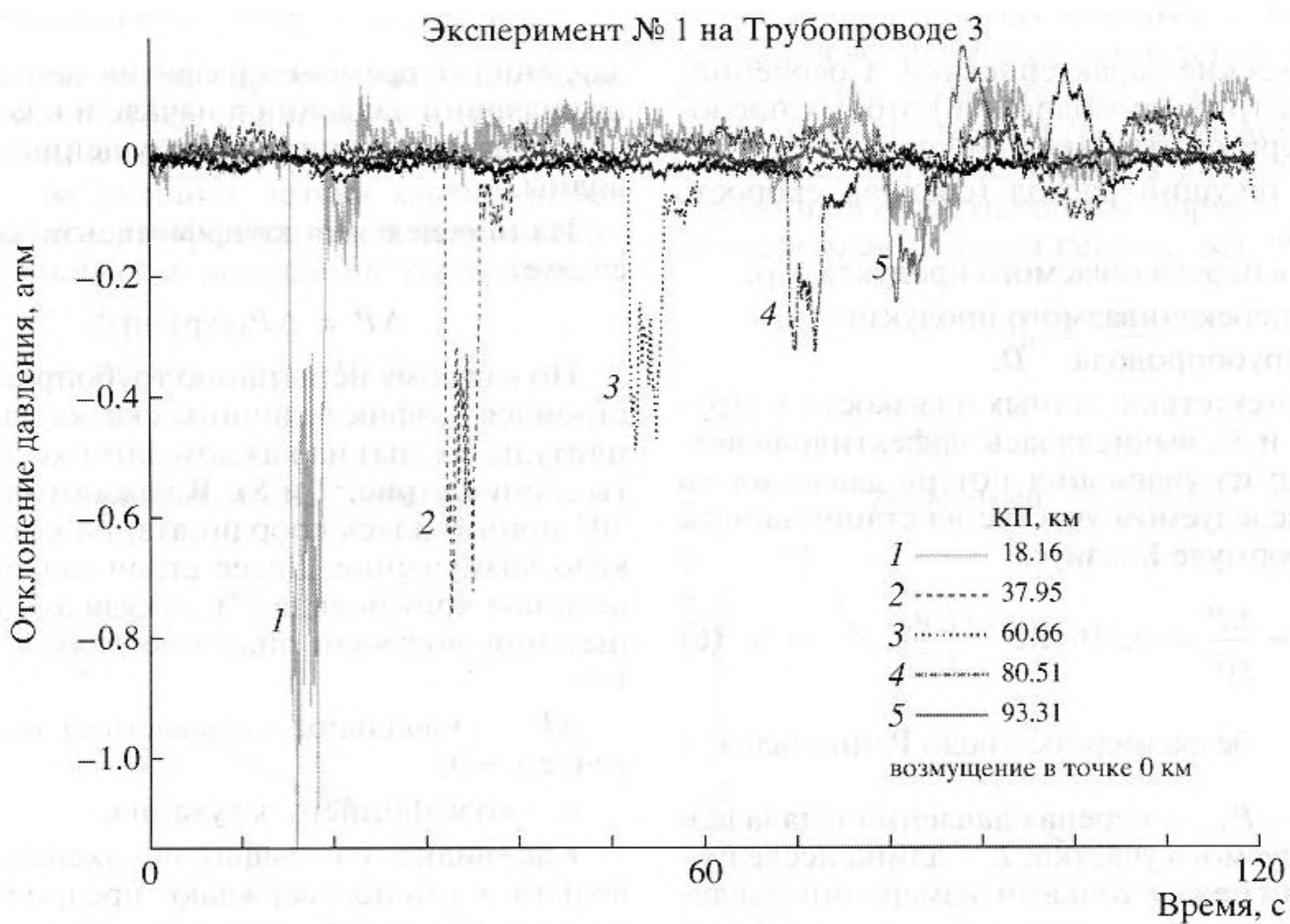


Рис. 4. Распространение возмущения, генерированного прикрытием линейной задвижки.

Изменения давления на фронте волны в работе являются определяющими величинами, но для определения зависимости коэффициента затуха-

ния необходимо знать параметры течения и характеристики перекачиваемой жидкости, в которой происходит затухание исследуемых волн, а

Эксперимент на Трубопроводе 4

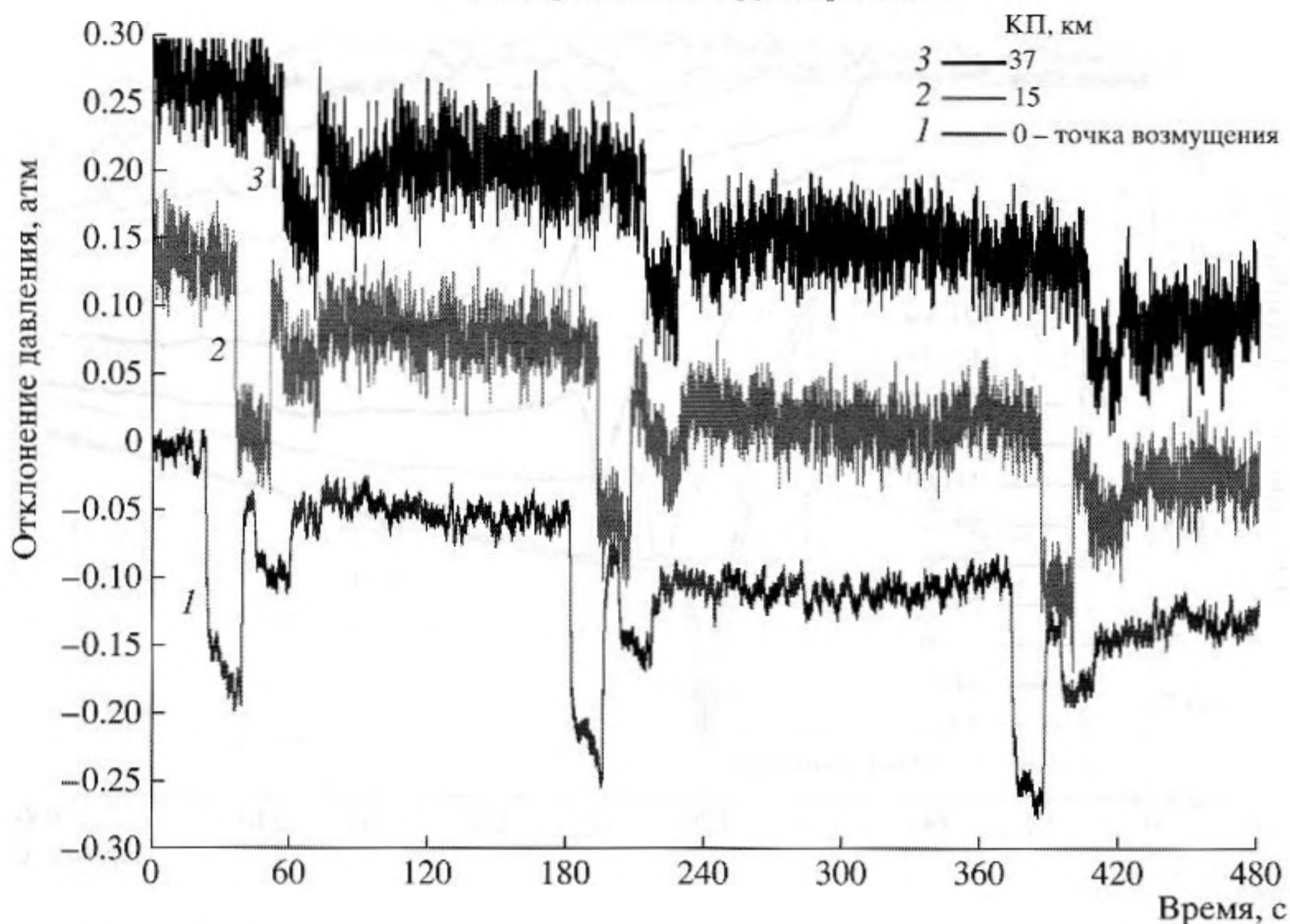


Рис. 5. Распространение возмущения, генерированного утечкой на шайбе Ду 13 мм.

также технические характеристики и особенности объектов-трубопроводов, на которых проводились эксперименты. Таковыми являются:

Средний текущий расход (средняя скорость течения) — u_0 ;

Плотность перекачиваемого продукта — ρ ;

Вязкость перекачиваемого продукта — ν ;

Диаметр трубопровода — D .

В случае отсутствия данных о вязкости ν (трубопроводы 1 и 3), вычислялась эффективная вязкость, исходя из уравнения потерь давления на трение на исследуемом участке на стационарном режиме по формуле Блазиуса:

$$\Delta Z + \frac{\Delta P}{g\rho} = 0.3164 \text{Re}^{-1/4} \frac{L u_0^2}{D 2g}, \quad (6)$$

$\text{Re} = \frac{u_0 D}{\nu}$ — безразмерное число Рейнольдса;

$\Delta P = P_{\text{кон}} - P_{\text{нач}}$ — перепад давлений в начале и конце исследуемого участка; L — длина исследуемого участка (между точками измерений давлений); $\Delta Z = Z_{\text{кон}} - Z_{\text{нач}}$ — разница высот начала и конца исследуемого участка (точек измерений давлений).

Визуально определялись начало и конец фронта волны (рис. 6), если их можно было выделить на фоне общего гидродинамического шума трубы. За фронт волны принималось падение

давления со временем развития менее 2 с. Разница значений давления в начале и в конце фронта волны давала величину возмущения — амплитуду волны.

Из определения коэффициента затухания (2) следует:

$$\Delta P = \Delta P_0 \exp(-\eta x). \quad (7)$$

По каждому испытанию трубопроводов 1, 3 и 4 строился график величины скачка давления (амплитуды волны) на каждом датчике от координаты датчика (рис. 7 и 8). В каждом испытании за "0" принималась координата, на которой возникло возмущение. Далее строилась аппроксимационная кривая вида (7), откуда для каждого испытания получали значение двух коэффициентов:

ΔP_0 — начальное (задаваемое) возмущение в точке $x = 0$;

η — коэффициент затухания.

Как видно из графиков, эксперименты довольно точно подтверждают предположение, что возмущение в трубе затухает экспоненциально.

Как было сказано выше, запись сигналов на трубопроводе 2 велась лишь в двух точках. Коэффициент затухания определялся по формуле (7) для каждого эксперимента. Таким образом, полученные с трубопровода 2 значения коэффициента затухания имеют погрешность 30%, определяе-

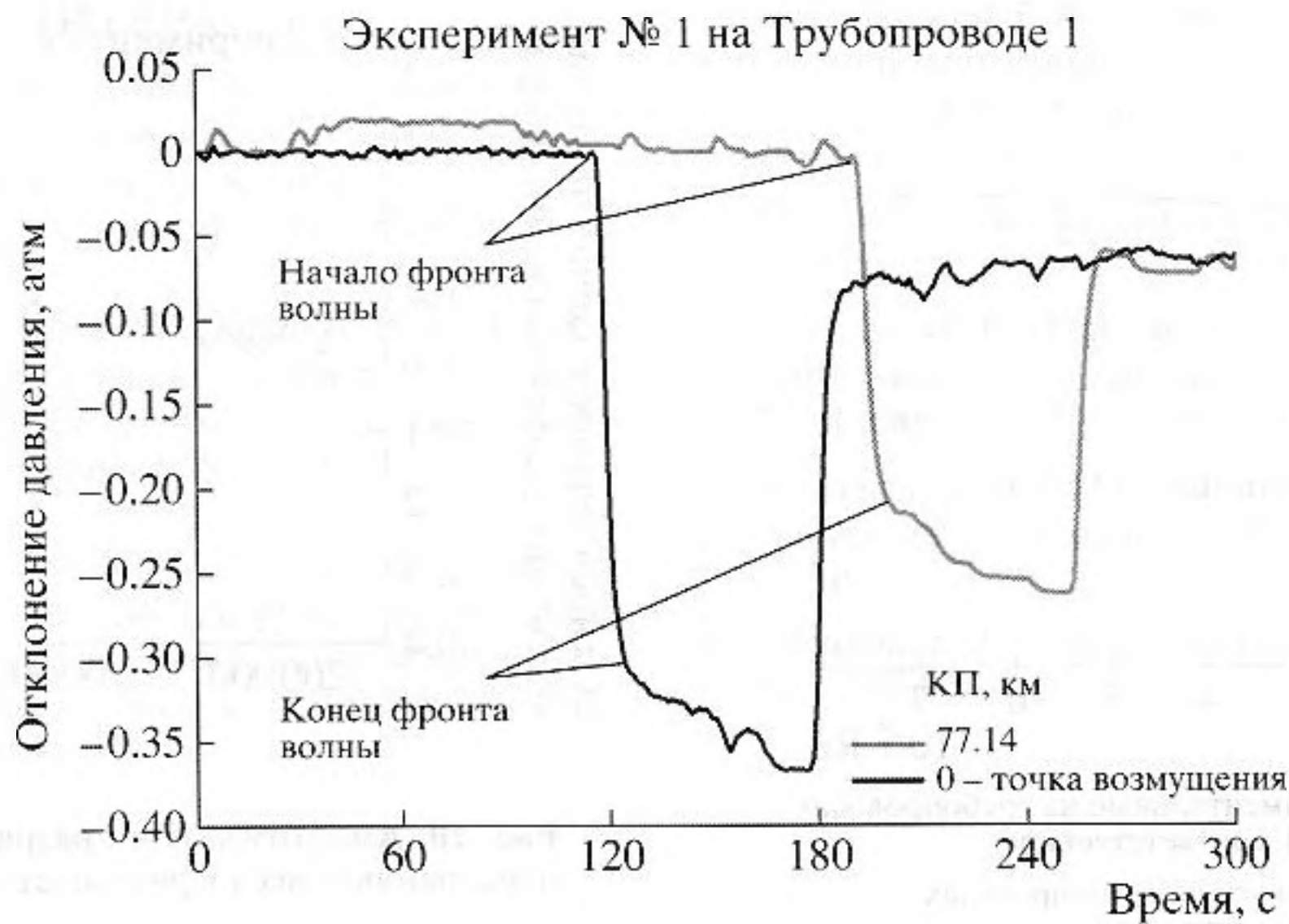


Рис. 6. Визуальное определение по графикам начала и конца фронта волны.

мую отношениями величин исследуемых сигналов к величине шума.

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Универсальный коэффициент затухания

Очевидно, что затухание волновых процессов в турбулентном потоке происходит в основном благодаря силам вязкого трения. Отношение сил трения к силам инерции потока характеризует число Рейнольдса. Таким образом, нам необходимо искать зависимость коэффициента затухания от числа Рейнольдса:

$$\eta = \eta(Re) = \eta(u_0 D / \nu).$$

На основе обработанных данных со всех экспериментов построим график зависимости коэффициента затухания η от безразмерного параметра Re (рис. 9).

При стремлении числа Рейнольдса к нулю течение становится ламинарным и коэффициент затухания волны может вычислен по формуле (3). В предположении, что при ламинарном течении закон трения выражается формулой Стокса [8] $\lambda = 64/Re$, получим, что коэффициент волнового затухания в области работы формулы Стокса, т.е. при стремлении числа Рейнольдса к 0, равен

$$\eta_0 = \frac{16\nu}{D^2 c}$$

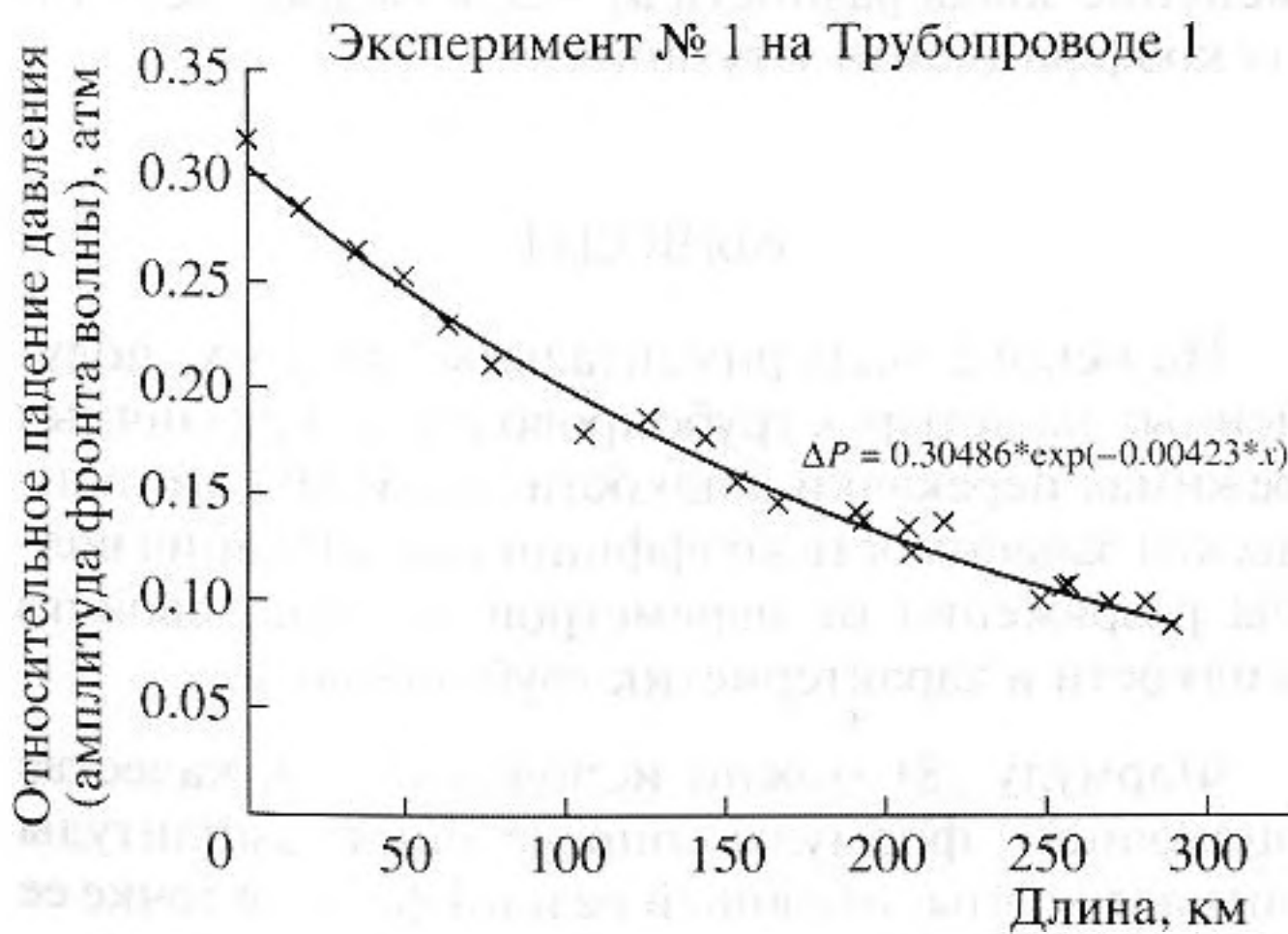


Рис. 7. Изменение амплитуды возмущения по длине трубопровода 1.

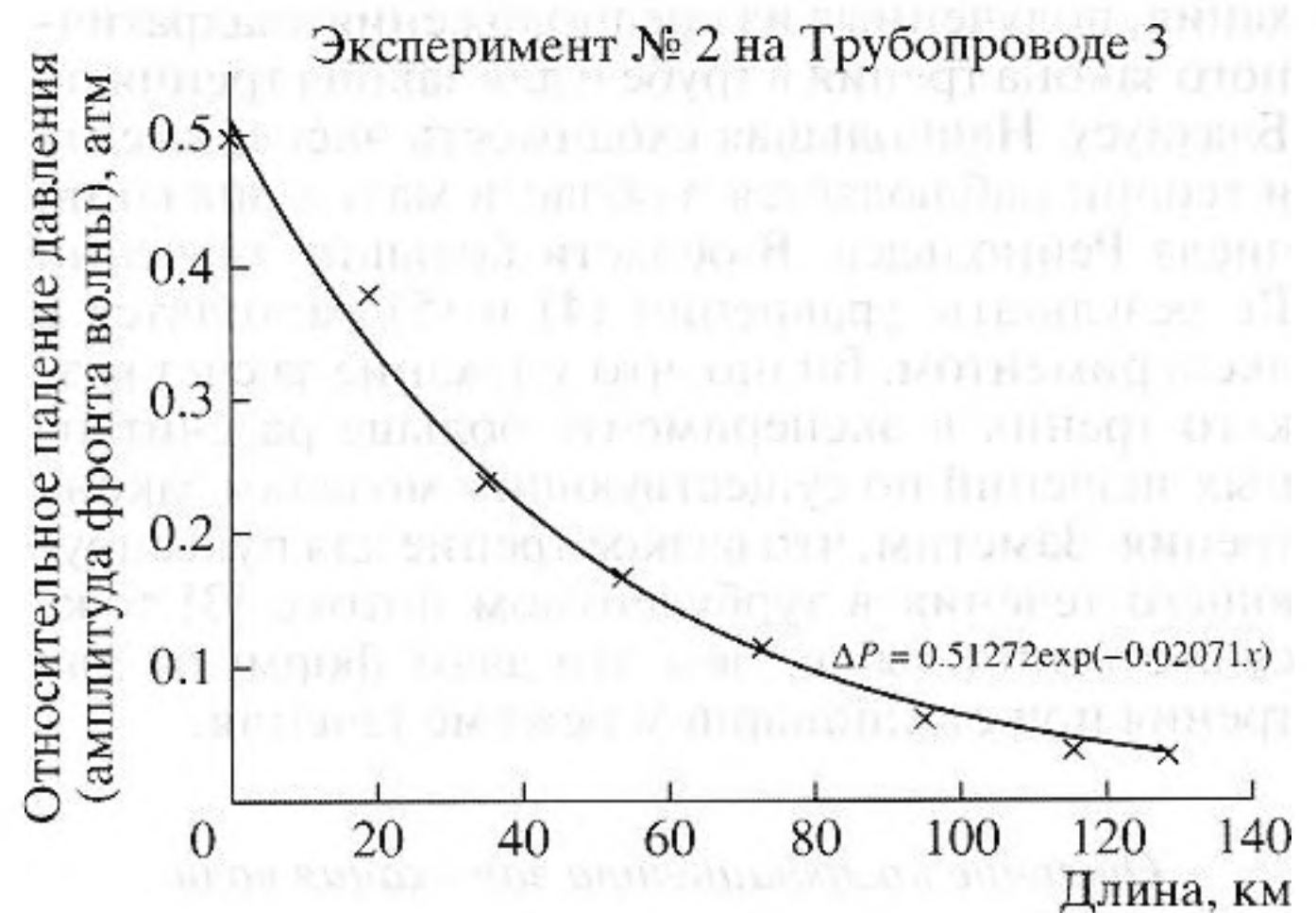


Рис. 8. Изменение амплитуды возмущения по длине трубопровода 3.

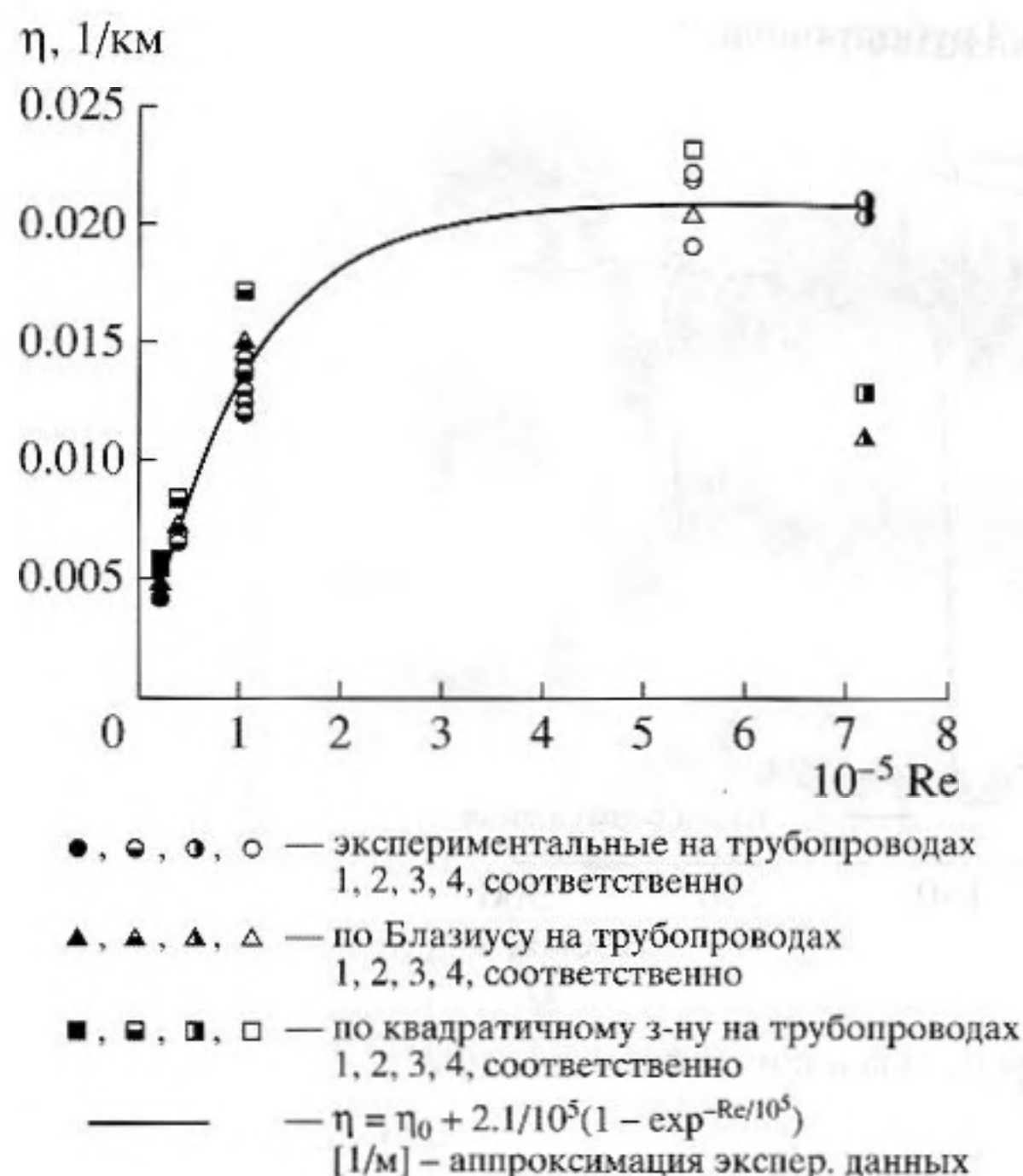


Рис. 9. Зависимость коэффициента затухания от числа Рейнольдса.

Окончательно, зависимость коэффициента затухания от числа Рейнольдса представляется в виде

$$\eta = \eta_0 + \frac{2.1}{10^5} [1 - \exp(-Re/10^5)] \text{ [1/м]}. \quad (8)$$

Обратим внимание на то, что в случае отсутствия данных по вязкости, пришлось воспользоваться формулой (6), подменяя вязкость ее эффективным значением. Полученное из (6) эффективное число Рейнольдса можно подставить в уравнение (8).

На рисунке 9 кроме экспериментальных точек нанесены точки значений коэффициентов затухания, полученные из предположения квадратичного закона трения в трубе и для закона трения по Блазиусу. Наибольшая сходимость эксперимента и теории наблюдается в области малых значений числа Рейнольдса. В области больших значений Re результаты уравнений (4) и (5) расходятся с экспериментом. Видно, что затухание за счет вязкого трения в эксперименте больше рассчитанных значений по существующим моделям закона трения. Заметим, что вязкое трение для пульсирующего течения в турбулентном потоке [3] тоже существенно выше, чем это дают формулы для трения при стационарном режиме течения.

Отличие коэффициента затухания волн тормозящих и разгоняющих поток

На всех предыдущих экспериментах рассматривались только волны падения давления. Обра-

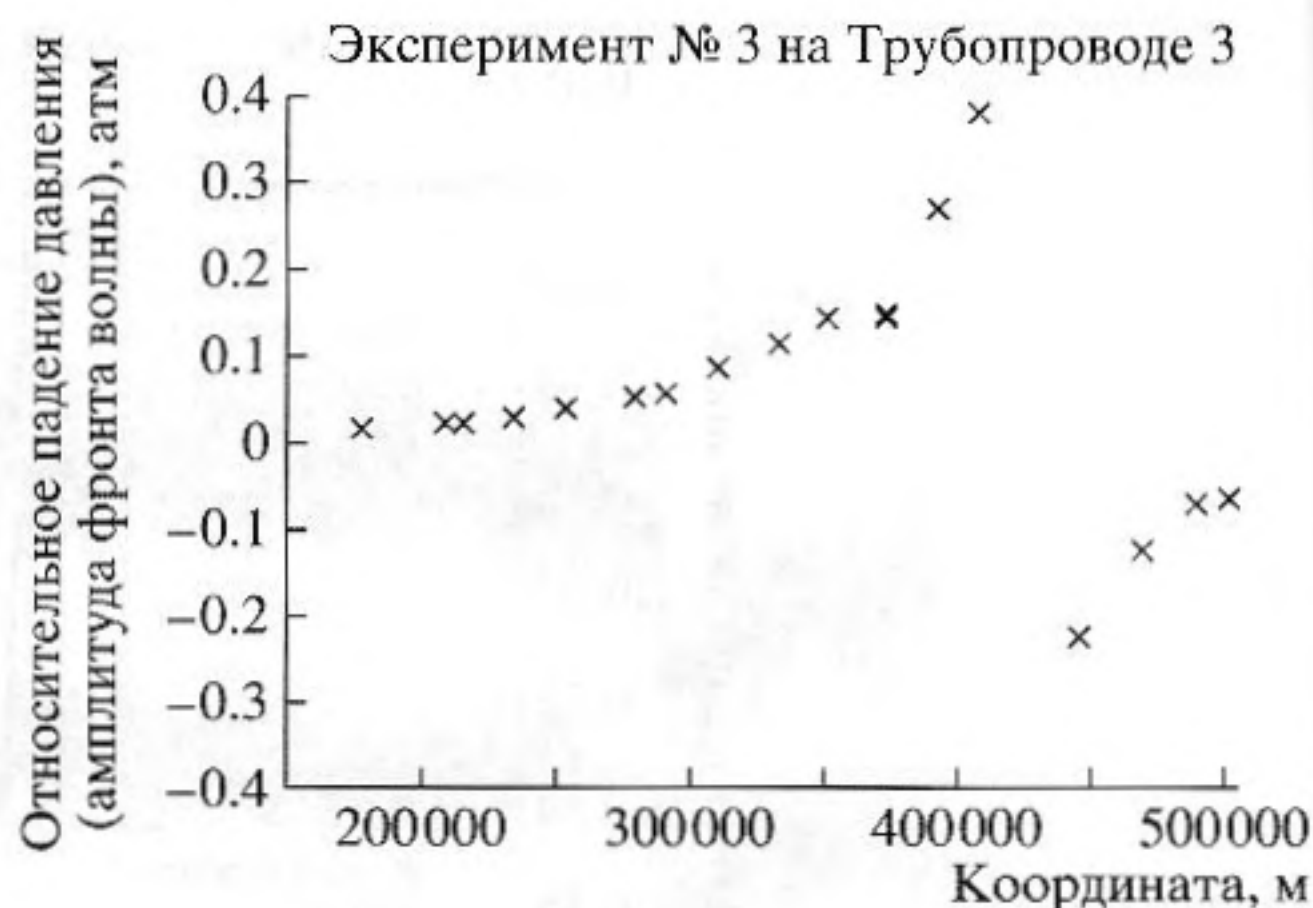


Рис. 10. Амплитуда волн разряжения и сжатия, распространяющиеся в разные стороны.

зование подобных волн, например, сопровождается процессом возникновения утечки. Кроме рассмотренных выше волн разряжения, в трубопроводе существуют также волны сжатия. Например, при движении задвижки обязательно с одной стороны образуется волна сжатия, а с другой — разряжения.

На трубопроводе 3 при исследованиях волновых процессов, возникших при движении линейных задвижек, были получены результаты по распространению волн обоих типов возмущений (рис. 10). Выявлена закономерность: значения коэффициента затухания волны разрежения меньше коэффициента затухания волны сжатия.

Для трубопровода 3 эта разница составила 0.009 1/км, то есть затухание волн при торможении потока почти в 2 раза больше чем при разгоне. Формула (4) описывает это явление [6] — изменение знака разности $u_1 - u_0$ изменяет величину коэффициента затухания.

ВЫВОДЫ

На основе экспериментальных данных, полученных на четырех трубопроводах при различных режимах перекачки жидкости, получена эмпирическая зависимость коэффициента затухания волны разрежения от параметров течения, свойств жидкости и характеристик трубопровода.

Формулу (8) можно использовать в качестве оценочной формулы определения амплитуды сигнала волны, имеющей резкий фронт в точке ее образования. Такие волны возникают, например, при мгновенном образовании утечки из трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбашов Е.Д., Гликман Б.Ф., Казаков А.А., Морозов С.А. Экспериментальное исследование акустических характеристик столба жидкости в непроходных трубах // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 4. С. 478–488.
2. Барбашов Е.Д., Гликман Б.Ф., Казаков А.А. Экспериментальное и теоретическое определение акустических характеристики потока в цилиндрической трубе // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 6. С. 735–741.
3. Барбашов Е.Д., Гликман Б.Ф., Казаков А.А. Экспериментальное исследование напряжения трения о стенки цилиндрической трубы в пульсирующем турбулентном потоке жидкости // Минск. ИФЖ. 2000. Т. 73. № 4. С. 704–711.
4. Лебединский Е.В., Натанзон М.С., Никифоров М.В. Экспериментальный метод определения динамических свойств газовых потоков // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 5. С. 660–684.
5. Под ред. С.М. Вайнштока Трубопроводный транспорт нефти. Т. 1 // М.: Недра, 2004. 198 с.
6. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах, Изд. 2, перераб. и доп. // М.: Недра, 1975. С. 186–191.
7. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах // М.-Л., Гостехиздат, 1949. 103 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя // М.: Наука, 1974. 740 с.