



SCIENTIFIC BULLETIN
PHYSICAL AND
MATHEMATICAL RESEARCH

ILMIY HABAR NOMA
FIZIKA-MATEMATIKA
TADQIQLARI

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<u>Физика</u>
С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, А.С. САИДОВ, А.Й. БОБОЕВ, Б.М. ЭРГАШЕВ Получения, морфология и фотоэлектрические свойства гетероструктуры $n\text{-Si}-p\text{-}(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$	7
Н.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, К.А. ИСМАЙЛОВ, С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, З.Т. КЕНЖАЕВ, Б.К. ИСМАЙЛОВ Влияние легирования никелем на спектральную чувствительность кремниевых солнечных элементов	16
М.Ш. ИСАЕВ, А.Т. МАМАДОЛИМОВ, Ш.К. АКБАРОВ Структура приповерхностного слоя диффузионно-легированного кремния атомами хрома и кобальта.....	21
М.В. TAGAEV, А.А. ABDREYMOV, U.D. BAIRAMOV Kremniyli p-n o'tishda mikroplazmalarning shakllanishi.....	27
М.В. FOZILJONOV, I.N. KARIMOV, A.E. ABDIKARIMOV Influence of the local trapped charge in oxide to the gate - drain capacitance in a FinFET	33
Ш.Х. ЙУЛЧИЕВ, И.М. СОЛИЕВ, Х.Ж. МАНСУРОВ Рентгеноструктурные исследования кремния марки КДБ-20 с участием кислорода.....	37
	<u>Техника</u>
Р.А. МУМИНОВ, В.Г. ДЫСКИН, О.Ф. ТУКФАТУЛЛИН, Б.Н. БУТУНБАЕВ, К.А. ДЖУМАМАРУТОВ К вопросу применения гидрофобных плёнок для пассивной очистки фронтальной поверхности фотоэлектрических модулей.....	42
С. ЗАЙНАБИДИНОВ, Б. УРМАНОВ, С. АЛИЕВ Разработка конструкции нового солнечного осветительного устройства.....	47
С.С. НАСРИДДИНОВ, А.К. ХАМРАКУЛОВ, Н.Т. МОВЛОНОВ, М.И. МАННАНОВ Метод определения удельного сопротивления почвы.....	53
Ш.А. ГУЛАМОВ, Г.М. МҮМИНОВА Легирланган ва лнгирланмаган қўға ўсимлиги толаларини тайорлаш хамда уларнинг оптоэлектроник хоссалари тадқиқ қилиш усуллари.....	58
	<u>Математика</u>
А.К. УРИНОВ, Д.А. УСМОНОВ Нелокальная задача для вырождающегося уравнения второго порядка, содержащего интегро-дифференциальный оператор дробного порядка с функцией бесселя в ядре.....	64
N. UMRZAQOV, I.S. ZAYNABIDDINOV On a pursuit differential game with integral constraints in \mathbf{R}^n	75
Д.Д. АХМЕДОВА Динамические системы симплекса квадратичных гомеоморфизмов.....	83

Ф.А. ЮСУПОВ, Д.Д. АХМЕДОВА	
Инвариантность некоторых стохастических квадратичных операторов неволтеррного типа в двухмерном симплексе.....	87
<u>Информатика</u>	
Р.К. АЗИМОВ, Б.Р. АЗИМОВ	
Машинали ўқитишда регрессия усуллари.....	90
М.К.МАХКАМОВ, Х.А.МАМАДАЛИЕВ, Ш.Ш.ХОЖИКУЛОВ	
Метод Фурье для исследования распространения волны уплотнения в трубопроводах установленном демпфером.....	96
Ғ.О. ТАЖИБАЕВ, М.М. МИРЗАЕВА, Ш.О. ТЎРАХОНОВА.	
Юпқа пластина эгилиши масаласини интегралли усулда ечишда чегаравий шартларга боғлиқ бўлган маҳсусликни эътиборга олиш.....	104
<u>Персоналии</u>	
Академиг М.Мусахонов 80 ёшда.....	111
<i>Правила оформления статьи</i>	113

Метод фурье для исследования распространения волны уплотнения в трубопроводах установленном демпфером

М.К.Махкамов¹, Х.А.Мамадалиев², Ш.Ш.Хожикулов³

¹Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура, 170100 Андижан, Узбекистан

²Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, 100084 Ташкент, Узбекистан

³Институт механика и сейсмостойкости сооружений имени М.Т.Уразбаева, 100125 Ташкент, Узбекистан

Получена 21 апрел 2023 г. Принята к печати 10 мая 2023 г.

Аннотация: Рассмотрены задачи перехода об одного стационарного режима течения к другому в трубопроводе с постоянным уклоном. На входе в участок задано значение давления, а на выходе установлен воздушный колпак с определенным объемом. Моделирование процесса распространения волны уплотнения в элементарном участке трубопровода произведено согласно линеаризованной квазидномерной модели Н.Е. Жуковского, а учет демпфера – по И.А. Чарному. Задача решена методом разделения переменных. Показано, что увеличением объема демпфера убывают амплитуда и частота возмущений, обусловленные переходным процессом.

Ключевые слова: ударная волна, демпфер, волны уплотнения, линеаризация, уравнение Н.Е. Жуковского, ряд Фурье, вычислительный эксперимент.

Annotation. The problems of transition from one stationary flow regime to another in a pipeline with a constant slope are considered. At the inlet to the section, the pressure value is set, and an air cap with a certain volume is installed at the outlet. Modeling of the process of propagation of the compression wave in an elementary section of the pipeline was carried out according to the linearized quasi-one-dimensional model of N.E. Zhukovsky, and damper accounting - according to I.A. Charny. The problem is solved by the method of separation of variables. It is shown that an increase in the volume of the damper decreases the amplitude and frequency of perturbations due to the transient process.

Keywords: shock wave, damper, compression waves, linearization, N.E. Zhukovsky, Fourier series, computational experiment.

Аннотация: Ўзгармас бурчакли оғма қувурда оқимнинг бир стационар режимдан бошқасига ўтиш ҳакидаги масала қаралган. Участкага киришда босимнинг қиймати, чиқишида эса аниқ ҳажмли хаволи калпак ўрнатилган. Қувур чизиқли қисмида зичланиш тұлқинининг тарқалиши жараёни Н.Е.Жуковскийнинг чизиқлилаштирилган квазибірүлчовли модельдегі күра модельлаштирилған, демпфир ҳисоби эса- И.А.Чарний усули бүйіча олинған. Демпфирнинг ҳажмі ортиб бориши билан босим тойишлари амплитуда ва частотаси камайиши ўтиш жараёнлари бүлганида күрсатыб берилған.

Калит сүзлар: зарб тұлқини, демпфер, зичланиш тұлқини, чизиқлилаштириш, Н.Е.Жуковский тенгламаси, Фурье қатори, ҳисоблаш тажрибаси.

Введение. Ударная волна часто встречается в природе и технике и может иметь положительный или отрицательный эффект [1-6]. В работе отбойного молотка она используется пользой. Многократные повторения воздействия ударной волны могут привести к постепенному разрушению техники, т.к. образует вибрации с разными амплитудой и частотой возмущений. При быстром закрытии живого сечения горизонтального или наклонного трубопроводов могут образоваться большие скачки давления, обусловленные переходом кинетической энергии транспортируемой среды на потенциальную энергию сжатия [7-11].

Первые теоретические и экспериментальные результаты по природе

ударной волны в трубопроводах получены Н.Е. Жуковским. В его работах учитывались малая сжимаемость транспортируемой жидкости и деформация тонкой стенки трубопровода под воздействием ударной волны [12]. Квазидномерная математическая модель трубопроводной транспортировки жидкостей и газов в условиях распространения волны уплотнения широко применяется при решении научных и практических задач.

Разработаны различные аналитические и численные способы решения полных или сокращенных вариантов линейных и нелинейных квазидномерных уравнения трубопроводного транспорта сжимаемых или малосжимаемых сред [12-19]. Анализ показал, что мало работ, посвященных изучению

изменений импульса жидкости в наклонных трубопроводах. В настоящей работе наклон трубопровода принимается постоянный. Кроме этого в уравнении сохранения импульса учитываются локальная составляющая силы инерции жидкости и сила сопротивления по формуле Дарси – Вейсбаха. Уравнение неразрывности представлено через скорость распространения малых возмущений давления в среде трубы-жидкость.

Постановка и решение задачи. На входе в участок задано значение давления, а на выходе установлен воздушный колпак. Демонстрирован способ учета демпфера в граничном условии по И.А. Чарному [12].

Линеаризованное уравнение сохранения и переноса импульса решено методом Фурье. Подстановкой найденного значения скорости в исходные уравнения составлены и интегрированы уравнения относительно гидростатического давления. Передавлены численные результаты для отдельных вариантов процесса распространения волны уплотнения. Целью задачи является исследование динамического состояния элементарного участка трубопровода при переходе из одного режима скорости в другой. Рассматривается трубопровод с длиной l и диаметром D_0 . Уклон трассы трубопровода постоянный и составляет $\sin \alpha$. В качестве начально условия для скорости принимается

$$w(x, 0) = w_0 = \text{const}.$$

Начальное распределение давления учитывает входное давление p_{00} , перепад давления за счет силы трения и гравитации:

$$p(x, 0) = p_{00} - \rho(2aw_0 + g \sin \alpha)x.$$

$$\text{Здесь } 2a = \frac{\lambda w_*}{2D} = \text{const}; \sin \alpha = \frac{dy}{dx};$$

λ – коэффициент сопротивления; w_* – характерная скорость рассматриваемого объекта (в данном случае – параметр осреднения); $y(x)$ – нивелирная высота оси трубопровода.

На входе задано значение давления

$$p(0, t) = p_{00} = \text{const}.$$

Интенсивность отбора жидкости с конца участка при $t > 0$ составляет $Q(t)$ (m^3 / c).

Перед выходом из участка установлен воздушный колпак. В невозмущенном состоянии объем и давление газа в воздушном колпаке составляют V_0 и p_0 . Данное граничное

условие, отражающее подключение воздушного колпака, сформулируем по И.А. Чарному [12].

До воздушного колпака объемный расход жидкости составляет $(fw)_{x=l}$, где $f = \pi D^2 / 4$ – площадь поперечного сечения, а D – диаметр трубопровода. На выходе, как уже отметили, расход составляет $Q(t)$. Их разность приводит к изменению объема газа в воздушном колпаке по времени:

$$\frac{dy}{dx} = (fw)_{x=l} - Q(t).$$

При изменении объема жидкости можно пренебречь изменением температуры газа. Поэтому новое состояние воздуха p и $V_0 - y$ удовлетворяют условию:

$$p_0 V_0 = p(V_0 - y).$$

Т.е. новое значение давления в воздушном колпаке составляет

$$p = \frac{p_0 V_0}{V_0 - y}.$$

Поскольку изменение y малое ($y \ll V_0$), то можно принять

$$p = \frac{p_0}{1 - y/V_0} \approx p_0 \left(1 + \frac{y}{V_0}\right).$$

$$\text{Отсюда находим } y = \frac{p - p_0}{p_0} V_0 \text{ и}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{V_0}{p_0} \frac{dp}{dt}.$$

Приравняв правые части двух равенств для $\frac{dy}{dt}$, получим условие на выходе из участка:

$$\frac{V_0}{p_0} \frac{dp_{x=l}}{dt} = (fw)_{x=l} - Q(t).$$

Уравнения состояния участка моделируем на основе уравнений Н.Е.Жуковского с поправкой – с учетом силы гравитации [12]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + 2aw + g \sin \alpha \right), \\ -\frac{\partial p}{\partial t} = \rho c \frac{\partial w}{\partial x}. \end{cases}$$

$$\text{Здесь } c^2 = \left(\frac{\rho_0}{k} + \frac{D\rho_0}{E\delta} \right)^{-1/2} \text{ — скорость}$$

распространения малых возмущений в системе жидкость-труба; ρ, k — плотность жидкости в состоянии покоя и ее модуль упругости; E, δ — модуль Юнга материала, из чего изготовлен трубопровод, и толщина трубы ($\delta \ll D$).

Поскольку $\frac{\partial p}{\partial t}$ можно выразить

согласно второму уравнению системы, то второе граничное условие задачи по скорости w приобретает вид:

$$-\beta \frac{\partial w(l, t)}{\partial t} = w(l, t) - w.$$

При отключенном демпфере данное условие становится условием первого рода: $w(l, t) = w_A$. Здесь и далее использовано обозначение $\beta = \frac{\rho c V}{fp}$.

В целом, такая постановка задачи отличается от других задач тем, что одновременно учитывается и уклон трассы, и наличие демпфера в конце участка.

Выделим решение задачи относительно скорости. Для нее уместны условия

$$w(x, 0) = w, \frac{\partial w(x, 0)}{\partial t} = 0,$$

$$\frac{\partial w(0, t)}{\partial x} = 0, \beta \frac{\partial w(l, t)}{\partial x} + w(l, t) = w_A,$$

где ограничиваемся рассмотрением случая, когда новая скорость на выходе из участка составляет w_A .

При этом из исходной системы составляет уравнение телеграфного типа [13-14]:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2a \frac{\partial w}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}.$$

Для применения метода Фурье граничные условия задачи необходимо привести к однородной форме. В нашем случае такое возможно, если принять замену

$$u(x, t) = w(x, t) - w_A.$$

При этом уравнения, начальные условия и первое граничное условия записываются просто через $u(x, t)$, а второе граничное условие приобретает однородной формы:

$$\frac{\partial u(l, t)}{\partial x} + \frac{1}{\beta} u(l, t) = 0.$$

Решение $u(x, t)$ ищем в виде:

$$u(x, t) = X(x)Y(t).$$

Тогда, по правилам метода Фурье [13-14], имеем

$$\frac{Y''(t) + 2aY'(t)}{Y(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda^2.$$

Здесь $\lambda > 0$, иначе получим тривиальное (нулевое) решение задачи.

Составим автономное уравнение для $X(x)$:

$$X''(x) + \lambda^2 X'(x) = 0.$$

Решение его ищем в виде

$$X(x) = B \sin \lambda x + C \cos \lambda x.$$

Реализация граничных условий приводит к частным собственным функциям:

$$X_n(x) = \cos \lambda_n x,$$

где собственные числа λ_n задачи является положительными корнями характеристического уравнения

$$\operatorname{tg} \lambda_n l = \frac{1}{\beta \lambda}.$$

Доказали ортонормированность собственных функций $X_n(x)$:

$$\int_0^l \sin \lambda_n x \sin \lambda_m x dx = \begin{cases} \|X_n(x)\|^2 = \frac{1}{2}(l + \beta \sin^2 \lambda_n l) & \text{при } n = m, \\ 0 & \text{при } n \neq m. \end{cases}$$

Поиск собственных функций по времени привел к уравнению:

$$Y_n''(t) + 2aY_n'(t) + c^2 \lambda_n^2 Y_n(t) = 0.$$

Характеристическое уравнение данного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид:

$$s_n^2 + 2as_n + c^2 \lambda_n^2 = 0.$$

При обозначении $D_n = a^2 - c^2 \lambda_n^2$ получим

$$(s_n)_{1,2} = -a \pm \sqrt{D_n}.$$

В связи с этим имеем:

$$Y_n(t) = \begin{cases} e^{-at} (A_n \operatorname{ch} \sqrt{D_n} t + B_n \operatorname{sh} \sqrt{D_n} t) & \text{при } D_n > 0, \\ e^{-at} (A_n + B_n t) & \text{при } D_n = 0, \\ e^{-at} (A_n \cos \sqrt{|D_n|} t + B_n \sin \sqrt{|D_n|} t) & \text{при } D_n < 0 \end{cases}$$

Т. о., решение $u(x, t)$ составляет

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n l}{\lambda_n \|X_n\|^2} \begin{cases} e^{-at} (A_n \operatorname{ch} \sqrt{D_n} t + B_n \operatorname{sh} \sqrt{D_n} t) & \text{при } D_n > 0 \\ e^{-at} (A_n + B_n t) & \text{при } D_n = 0 \\ e^{-at} (A_n \cos \sqrt{|D_n|} t + B_n \sin \sqrt{|D_n|} t) & \text{при } D_n < 0 \end{cases} \cos \lambda_n x.$$

В частном случае $\beta \rightarrow 0$ (т.е. при $V_0 \rightarrow 0$) с учетом условия $X'_n(0) = 0$ собственными функциями будут $X_n(x) = \cos \lambda_n x$ при $\lambda_n = \frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{l}$ [7]. При этом принимается $\|X_n(l)\|^2 = \frac{l}{2}$.

При $\beta \neq 0$ значения собственных чисел λ_n находим численным решением характеристического уравнения. Сначала выделили границу промежутка принадлежности n -го корня: $(n-1)\pi < \lambda_n \leq (n-0,5)\pi$. Далее значения $\lambda_n l$ уточняли методом деления отрезка пополам [20]. При этом наибольшее число шагов приближения 42 было достаточно для обеспечения точности расчета λ_n до 10^{-10} при $l = 1000$ м.

Для нахождения гидростатического давления интегрировали второе уравнение исходной системы по времени от 0 до t :

$$p(x, t) = p(x, 0) - \rho c^2 \int_0^t \frac{\partial w(x, \theta)}{\partial x} d\theta.$$

Уменьшаемое известно из начального условия. Вычитаемое вычисляется по вновь полученному выражению для $w(x, t)$. Опуская подробности, приведем конечный результат:

$$p(x, t) = p_{00} - \rho (2aw_{00} + g \sin \alpha) x - \rho (w_0 - w_A) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n l}{\lambda_n \|X_n(x)\|^2} \times \begin{cases} e^{-at} (A_n ch \sqrt{D_n} t + B_n sh \sqrt{D_n} t) & \text{при } D_n > 0 \\ e^{-at} (A_n + B_n t) & \text{при } D_n = 0 \\ e^{-at} (A_n \cos \sqrt{D_n} t + B_n \sin \sqrt{D_n} t) & \text{при } D_n < 0 \end{cases} \sin \lambda_n x.$$

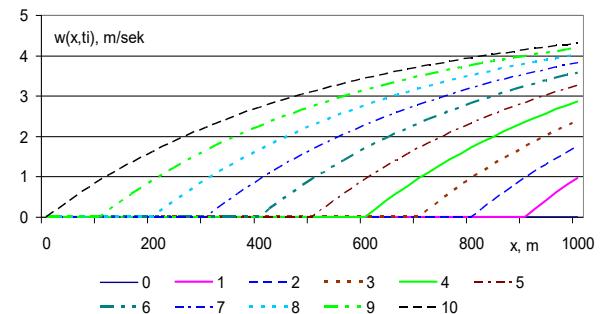
По представленному материалу составили программу расчета в среде Pascal ABC, где результаты представлялись в виде таблиц. Графики построили по программе Excel-2003. Характеристическое уравнение решили методом дихотомии с точностью 10^{-9} . В расчетах учитывали первые 500 первых членов ряда Фурье. Шаг по длине участка составил $l/50$, а шаг по времени $- l/(10c)$. Расчет проводили от 0-го до 600-го шага времени.

Были рассмотрены случаи $\sin \alpha = 0, \pm 0.1$ при длине участка 1000 м. Диаметр участка составил 20 см, а коэффициент сопротивления $\lambda = 0.018$. Параметр осреднения имел значение $w_* = 5 \text{ м/с}$, плотность

жидкости в невозмущенном состоянии $- 1000.0 \text{ кг/м}^3$, скорость распространения малых возмущений давления $c = 1200 \text{ м/с}$.

Объем подключенного к концу участка воздушного колпака брали 1.0, 0.1, 0.001, 0.0001 и 0.00001 кубических метров. Давление в воздушном колпаке без напряжения приняли $p_0 = 0.1 \text{ МПа}$.

Остановимся на результатах, которые получены для горизонтального трубопровода при $V_0 = 0.001 \text{ м}^3$.



На рис. 1 представлены графики скорости от 0-го до 10-го шага времени, в течении которого волна возмущения пробегает с конца участка до его начала (условный полупериод составляет $\tau = l/c$).

В начальное время скорость равна нулю. При открытии выходного конца скорость в конце участка постепенно растет, а возмущения перемещаются в сторону входного колпака. Так происходит из-за наличия воздушного колпака. При отсутствии воздушного колпака ожидается мгновенное увеличение скорости до w_A и передний фронт составляет скачок.

При $t = \tau$ волна достигает входное сечение участка (верхняя кривая на рис. 1, что и нижняя кривая на рис. 2).

Во входном сечении наложено условие постоянства давления $p(0, t) = p_{00} = \text{const}$. В связи с этим достигавшие входного сечения возмущения скорости приводят к возрастанию скорости отходу возмущения скорости обратно в сторону конца участка. Кривая $w(x, \tau)$ практически составляет условную огибающую кривых скорости в рассматриваемом интервале времени $(l/c; 2l/c)$. Условность заключается в том, что части кривой $w(x, t)$ и профили скорости в сечениях, которые еще не достигала волна, несколько отличаются друг от друга.

Сравнивая данные результаты со случаем $\lambda = 0$ и $V_0 = 0$ [7], когда имело бы

место $w(0, t) = 2w_A$, заметим, что в данном случае скорость не достигает даже 8 м/с ($< 2w_A$).

В третьем условном полупериоде, когда волна достигла конца участка с демпфером и обратно возвращается начале участка, возрастание скорости $w(l, t)$ происходит только 24-го временного шага, а дальше она убывает. В этом и выражается роль воздушного колпака. Рис. 1. Профили скоростей в 0-10-х моментах времени шагом $l / (10c)$. Данные приведены в тексте

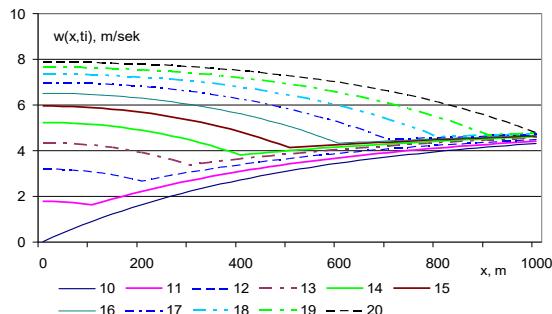


Рис. 2. Профили скоростей в 10-20 моментах времени с шагом $l / (10c)$. Данные см. в тексте

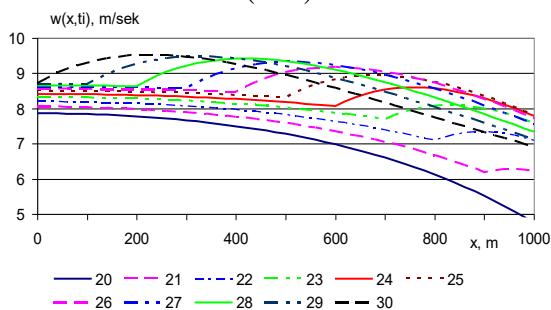


Рис. 3. Профили скорости при $2l / c \leq t \leq 3l / c$ с шагом $l / (10c)$

С истечением времени разрывы второго рода (производных функций) на фронте ударной волны и постепенно скоростное поле переходит к однородному распределению. При $t = 500 l / c$ наибольшее отклонение скорости от w_A составляет 0.001.

Согласно представленной квазидинамической модели Н.Е. Жуковского градиент давления пропорционален скорости потока и учитывает силы трения. В связи с этим в первом полупериоде давление начинает падать в конце участка, и эти возмущения распространяются против направления оси x (рис. 4). В отличие от случая $\lambda = 0$ и $V_0 = 0$, в данном случае образуются более гладкие кривые

давления. Но разрывы второго рода заметны на фронте волны.

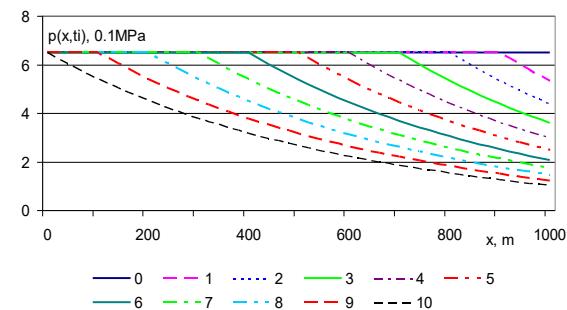


Рис. 4. Распределение давления в первом полупериоде с шагом времени $l / (10c)$

Анализ показал, что разрывы производных на фронте волны подчиняются соотношению Гюгонио по полному напору [21]: положительный скачок производной давления соответствует отрицательному скачку производной w . В нашем случае это соотношение имеет вид: $p + \frac{\rho w_*}{2} = \text{const}$. Оно

выполняется также при отражении волны с концов участка.

С истечением времени скачки производных давления, как и скачки производных скорости, постепенно убивают и процесс устанавливается (рис. 5).

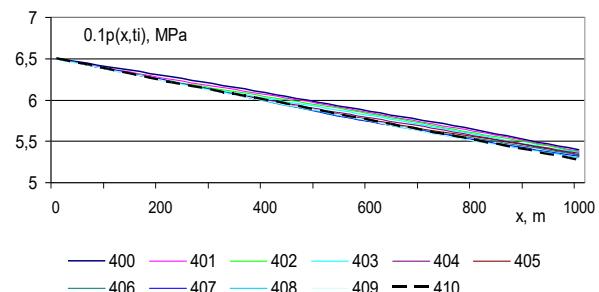


Рис. 5. Интервал изменения давления по длине участка в 40-м полупериоде.

На рис. 6 и 7 представлены изменения скорости и давления в сечениях при $V_0 = 0.001 \text{ м}^3$. Из них видно, что при $t \rightarrow \infty$ скорость стремится к своему предельному значению w_A , а давление – с своему значению в сечениях x согласно решению стационарной задачи при $w_0 = 5 \text{ м/с}$ и $p_{00} = 6.5 \text{ MPa}$. При этом явно выражается линейный перепад давления по длине участка: при $t \rightarrow \infty$ с увеличением расстоянию давление падает линейным законом.

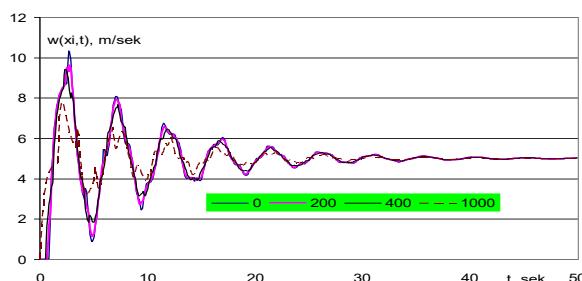


Рис. 6. Изменение скорости по времени в разных сечениях участка. $V_0 = 0.001 \text{ м}^3$

Из этих графиков следует наличие двойных экстремумов в полупериодах, природу которого в дальнейшем следует обосновать.

На рис. 8 представлены изменения значения скорости в конце участка при различных значениях объема воздушного колпака. В них нижние графики отражают концевых скоростей при $V_0 = 1.000 \text{ м}^3$. Эти графики не законченные, т.к. в дальнейшем переходят к значению w_A . Т.е. при больших объемах воздушного колпака установление происходит медленно. Видно, что в конце участка, куда установлен воздушный колпак, несмотря большого перепада именно на этом конце, амплитуда возмущений ниже чем во входном сечении.

Графики при $V_0 = 0.1 \text{ м}^3$ сначала возрастают от 0 до 5 м/с , а дальше идет гашение колебательного процесса. Явно проглядывается два условно максимума в графиках.

Более трех условных максимумов наблюдали в графиках при $V_0 = 0.00100 \text{ м}^3$. В целом, уменьшении объема демпфера амплитуды возмущений скорости и давления в концах участка возрастают, а частоты возмущений увеличиваются.

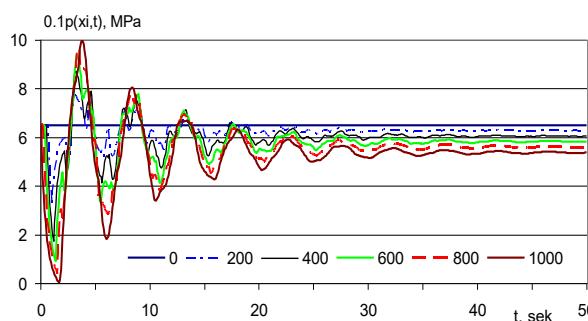


Рис. 7. Изменение давления с истечением времени в разных сечениях участка.

$$V_0 = 0.001 \text{ м}^3, p_\infty = 6.5 \text{ МПа.}$$

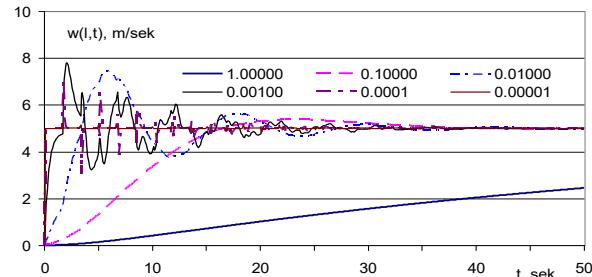


Рис. 8. Временное изменение выходной скорости при различных значениях объема воздушного колпака V_0

Выводы. С учетом включенного в конце участка воздушного колпака составлена математическая модель состояния элементарного наклонного и горизонтального участка трубопровода, когда на входе в участок задано постоянное значение давления.

Методом Фурье получено решение задачи по скорости, а решение по давлению найдено интегрированием уравнения неразрывности.

Обсуждены результаты расчетов, полученных для горизонтального участка для различных значений объема воздушного колпака. Выявлено, что при большом объеме воздушного колпака переход с одного режима на другой режим работы протекает гладко. С уменьшением объема воздушного колпака образуются возмущения скорости и давления, обусловленные образованием и распространением волны уплотнения. Частота и амплитуда возмущений возрастают при уменьшении объема воздушного колпака.

Исходя из представленного материала, можно прийти к заключению, что при заданном входном значении давления можно определить объем воздушного колпака, который обеспечивает гладкий переход с одного режима работы по расходу к другому режиму.

ЛИТЕРАТУРА

- Селезнёв В.Е., Алёшин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов. Методы, модели и алгоритмы. М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.

2. Deng Y. et al. A method for simulating the release of natural gas from the rupture of high-pressure pipelines in any terrain // Journal of Hazardous

Materials Volume 342, 15 January 2018, Pages 418-428.

3. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. – 214 p.

4. Peining Yu., Yi Li., Jing Wei., YingXu., Tao Zhang. Modeling the pressure drop of wet gas in horizontal pipe // Chinese Journal of Chemical Engineering Volume 25, Issue 7, July 2017, Pages 829-837

5. A. Lewandowski. New Numerical Methods for Transient Modeling of Gas Pipeline Networks. – NM: Pipeline Simulation Interest Group, 1995.

6. G.B. Whitham F.R.S. Linear and Nonlinear Waves. – NY: John Wiley & Sons, 1974

7. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Куканова М.А. Аналитическое решение задачи о распространении волны уплотнения в наклонном трубопроводе, вызванное торможением жидкости // Проблемы вычислительной и прикладной математики, Ташкент, 2015, №2, с.65-79.

8. В.В. Грачев, М.А. Гусейнзаде, Б.И. Ксендз, Э.И. Яковлев. Сложные трубопроводные системы. – М.: Недра, 1982, 256 с.

9. Грачев В.В., Щербаков С.Г., Яковлев Е.И. Динамика трубопроводных систем. – М.: Наука, 1987, 438 с.

10. Banda M.K., Herty M., Klar A. Gas flow in pipeline networks // Netw. Heterog. Media. Volume 1, Issue 1, Pages 41-56.

11. Khujaev I., Bozorov J., Akhmadjonov S. Investigation of the propagation of waves of sudden change in mass flow rate of fluid and gas in a “short” pipeline approach // 2019 IEEE Dynamics o Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 05-07 Nov 2019 (Omsk, Russia)

12. И.А. Чарный. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. Изд. 2-е. – М.: Недра, 1975, 296 с..

13. Б.М. Будак, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. Сборник задач по математическое физике. – М.: Наука, 1972, 678 с.

14. А.М. Тихонов, А.А. Самарский. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977, 736 с.

15. Bermúdez A., López X., Vázquez-Cendón M.E. Treating network junctions in finite volume solution of transient gas flow models // Journal of Computational Physics. - 2017, Vol. 344, p187-209.

16. Ebrahimi-Moghadam A. et al. CFD analysis of natural gas emission from damaged pipelines: Correlation development for leakage estimation //

Journal of Cleaner Production Volume 199, 20 October 2018, Pages 257-271.

17. Kurbatova G.I., Ermolaeva N.N. The Mathematical Models of Gas Transmission at Hyper-Pressure // Applied Mathematical Sciences, 2014. Vol. 8, No. 124. – P. 6191-6203.

18. Zhenhua Rui, Guoqing Han, He Zhang, Sai Wang, Hui Puc, Kegang Ling A new model to evaluate two leak points in a gas pipeline // Journal of Natural Gas Science and Engineering Volume 46, October 2017, Pages 491-497

19. I. K. Khuzhaev, S. S. Akhmadjonov, and M. K. Mahkamov Modeling the Stages of Verification of the Suitability of a Short Section of a Gas Pipeline for Operation // Mathematical Models and Computer Simulations, 2022, Vol. 14, No. 6, pp. 972–983.

20. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

21. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные схемы газовой динамики. – М.: Наука, 1975. – 352 с.

Application of the Fourier method to study the propagation of a compression shock wave in pipelines with a damper

M.K.Makhkamov¹, Kh.A.Mamadaliev², Sh.Sh.Khojikulov³

¹Andijan state university named after Z.M.Babur, 170100 Andijan, Uzbekistan

²Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, 100084 Tashkent, Uzbekistan

³Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T.Urazbaev of the AS RUZ, 100125 Tashkent, Uzbekistan

Keywords: shock wave, damper, compression waves, linearization N.E. Zhukovsky, Fourier row, computational experiment

Abstract. The problems of transition from one mode of steady flow to another in a pipeline with a constant gradient are considered. At the inlet to the section, the pressure value is set, and an air chamber of a certain volume is installed at the outlet. Modeling of the process of compression shock wave propagation in an elementary section of the pipeline was conducted according to the linearized quasi-one-dimensional N.E. Zhukovsky model, and the damper was considered according to the I.A.Charny model. The problem is solved by the method of separation of variables. It is shown that at an increase in the volume of the damper, the amplitude and frequency of perturbations decrease due to the transient process.

References

1. Seleznjov V.E., Aljoshin V.V., Prjalov S.N. Matematicheskoe modelirovanie truboprovodnyh setej i sistem kanalov. Metody, modeli i algoritmy. M.: MAKS Press, 2007. – 695 s.
2. Deng Y. et al. A method for simulating the release of natural gas from the rupture of high-pressure pipelines in any terrain // Journal of Hazardous Materials Volume 342, 15 January 2018, Pages 418-428.
3. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. – 214 r.
4. Peining Yu., Yi Li., Jing Wei., Ying Xu., Tao Zhang. Modeling the pressure drop of wet gas in horizontal pipe // Chinese Journal of Chemical Engineering Volume 25, Issue 7, July 2017, Pages 829-837
5. A. Lewandowski. New Numerical Methods for Transient Modeling of Gas Pipeline Networks. – NM: Pipeline Simulation Interest Group, 1995.
6. G.B. Whitham F.R.S. Linear and Nonlinear Waves. – NY: John Wiley & Sons, 1974
7. Huzhaev I.K., Mamadaliev H.A., Kukanova M.A. Analiticheskoe reshenie zadachi o rasprostranenii volny uplotnenija v naklonnom truboprovode, vyzvannoe tormozheniem zhidkosti // Problemy vychislitel'noj i prikladnoj matematiki, Tashkent, 2015, №2, c.65-79.
8. V.V. Grachev, M.A. Gusejnzaade, B.I. Ksendlz, Je.I. Jakovlev. Slozhnye truboprovodnye sistemy. – M.: Nedra, 1982, 256 s.
9. Grachev V.V., Shherbakov S.G., Jakovlev E.I. Dinamika truboprovodnyh sistem. – M.: Nauka, 1987, 438 s.
10. Banda M.K., Herty M., Klar A. Gas flow in pipeline networks // Netw. Heterog. Media. Volume 1, Issue 1, Pages 41-56.
11. Khujaev I., Bozorov J., Akhmadjonov S. Investigation of the propagation of waves of sudden change in mass flow rate of fluid and gas in a “short” pipeline approach // 2019 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 05-07 Nov 2019 (Omsk, Russia)
12. I.A. Charnyj. Neustanovivsheesja dvizhenie real'noj zhidkosti v trubah. Izd. 2-e. – M.: Nedra, 1975, 296 s..
13. B.M. Budak, A.A. Samarskij, A.N. Tihonov. Sbornik zadach po matematicheskoe fizike. – M.: Nauka, 1972, 678 s.
14. A.M. Tihonov, A.A. Samarskij. Uravnenija matematicheskoy fiziki. – M.: Nauka, 1977, 736 s.
15. Bermúdez A., López X., Vázquez-Cendón M.E. Treating network junctions in finite volume solution of transient gas flow models // Journal of Computational Physics. - 2017, Vol. 344, p187-209.
16. Ebrahimi-Moghadam A. et al. CFD analysis of natural gas emission from damaged pipe-lines: Correlation development for leakage estimation // Journal of Cleaner Production Volume 199, 20 October 2018, Pages 257-271.
17. Kurbatova G.I., Ermolaeva N.N. The Mathematical Models of Gas Transmission at Hyper-Pressure // Applied Mathematical Sciences, 2014. Vol. 8, No. 124. – P. 6191-6203.
18. Zhenhua Rui, Guoqing Han, He Zhang, Sai Wang, Hui Puc, Kegang Ling A new model to evaluate two leak points in a gas pipeline // Journal of Natural Gas Science and Engineering Volume 46, October 2017, Pages 491-497
19. I. K. Khuzhaev, S. S. Akhmadjonov, and M. K. Mahkamov Modeling the Stages of Verification of the Suitability of a Short Section of a Gas Pipeline for Operation // Mathematical Models and Computer Simulations, 2022, Vol. 14, No. 6, pp. 972–983.
20. Kalitkin N.N. Chislennye metody. – M.: Nauka, 1978. – 512 s.
21. Samarskij A.A., Popov Ju.P. Raznostnye shemy gazovoy dinamiki. – M.: Nauka, 1975. – 352

Сведения об авторов

Махкамов Мадаминжон Комилович – кандидат технических наук, доцент. Андижанский государственный университет, проректор.
E-mail: mailuzbek@mail.uz

Мамадалиев Хусниддин Абдижалилович – заведующий кафедрой Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, PhD
E-mail: x.mamadaliyev@tuit.uz
Телефон: +998935976917

Хожикулов Шахзод Шавкатжон ўғли – базовый докторант, Институт механика и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева.

E-mail: xoqilulovshaxzod202@gmail.com
Телефон: +998990780780