

УДК 539.3:532.5:622.691.4.053(204.1)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОДВОДНЫЙ ГАЗОПРОВОД В ТРАНШЕЕ С РАЗЖИЖЕННЫМ ГРУНТОМ

Е.Е. Гилёв<sup>1</sup>, С.Н. Шубин<sup>1</sup>, А.И. Боровков<sup>1</sup>, А.К. Абрамян<sup>2</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждается двумерная задача воздействия стоячей волны на подводный трубопровод. Трубопровод находится в траншее, заполненной разжиженным грунтом. Нестационарная задача волнения жидкости решается с помощью лагранжева подхода методом конечных элементов. Сцепление грунта с трубопроводом представлено реологической моделью сухого трения. Показано влияние параметров жесткости основания (разжиженного грунта) и силы сухого трения на колебания трубы.

*Ключевые слова:* подводный трубопровод, стоячая волна, метод конечных элементов, модель сухого трения, разжиженный грунт

## MODELING OF HYDRODYNAMIC IMPACT ON UNDERWATER GAS PIPELINE IN A TRENCH WITH LIQUEFIED SOIL

E.E. Gilyov<sup>1</sup>, S.N. Shubin<sup>1</sup>, A.I. Borovkov<sup>1</sup> and A.K. Abramian<sup>2</sup><sup>1</sup>St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Petersburg, Russia

The two-dimensional problem of standing wave impact on an underwater gas pipeline is discussed. The pipeline is placed in a trench filled with liquefied soil. The unsteady problem of the motion of heavy fluid is solved using the finite element method and the Lagrangian approach. A rheological model of dry friction represents pipe-to-soil adhesion. It is shown that the frame (liquefied soil) rigidity parameters and a dry friction force influence the pipeline oscillations.

*Keywords:* underwater pipe, standing wave, finite element method, dry friction model, liquefied soil

### 1. Введение

Как показывает практика эксплуатации объектов нефтегазовой промышленности, подводные переходы являются наиболее аварийно опасными в системе магистральных трубопроводов [1–3]. Экстремальное гидродинамическое воздействие поверхностных волн на подводный переход приводит к разжижению грунта вокруг подводного газопровода и является одной из причин его выхода из строя.

Податливость трубы в разжиженном грунте увеличивается вследствие ослабления контакта с грунтом, что снижает собственную частоту изгибных колебаний подводного перехода. Совпадение собственной частоты с частотой гидродинамического воздействия может привести к резонансным колебаниям трубы и, как следствие, к аварии на подводном переходе.

Экспериментальные данные показывают, что грунт под интенсивным повторяющимся гидродинамическим воздействием переходит в разжиженное состояние за довольно короткое время, которое может составлять десятки характерных периодов волнения [4–5]. Существующие модели учитывают гидродинамическое воздействие на трубу, частично или полностью погруженную в грунт [6, 7]. При этом не

рассматривается дальнейшее состояние трубопровода, находящегося в разжиженной среде под действием интенсивных гидродинамических нагрузок.

В данной статье предложен мультидисциплинарный подход, позволяющий рассматривать колебания трубы с учётом её взаимодействия с окружающей жидкостью. Цель работы — создание расчётной модели колебаний трубопровода в разжиженном грунте и её исследование, которое включает анализ влияния параметров модели взаимодействия трубы и разжиженного основания и сопоставление собственной частоты пролёта трубопровода с частотой гидродинамического воздействия.

## 2. Постановка задачи

Рассмотрим задачу гидродинамического воздействия стоячей волны на подводный трубопровод, не заполненный нефтепродуктом. На рисунке 1, *a* представлена схема задачи: на дне некоторого водоёма *1* находится прямая траншея с разжиженным грунтом *2*, в центре которой размещён трубопровод *3*. Обсудим двумерный случай, когда фронт стоячей волны ориентирован перпендикулярно оси трубопровода. Предположим, что пучность стоячей волны расположена над серединой траншеи. Возможность возникновения стоячей волны, локализованной в области протяжённой траншеи с массивным включением, показана в [8].

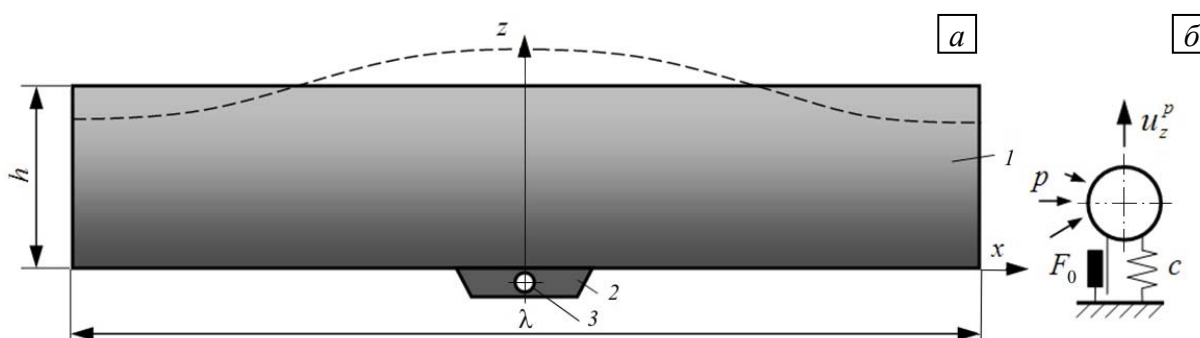


Рис. 1. Расчетная схема (*a*) и модель трубы (*б*)

Вертикальные колебания подводного газопровода в разжиженном грунте будем исследовать с помощью параметрической модели. Для описания движения одного пролёта газопровода выберем представительное сечение, что позволяет рассматривать только низшую форму колебаний. Продольным силам в трубопроводе и реакциям со стороны грунта, действующим на сечение, поставим в соответствие реологическую модель, состоящую из параллельно работающих упругого элемента и элемента сухого трения (Рис. 1, *б*). Первый из них соотносится с упругими перемещениями сечения трубы, второй — с рассеянием энергии при трении поверхности трубы о грунт. На рисунке 1, *б* обозначено:  $u_z^p$  — вертикальное перемещение трубы;  $F_0$  — величина сухого трения;  $c$  — жёсткость упругого элемента;  $p$  — давление на поверхность трубопровода;  $x$  и  $z$  — оси координат. Пунктирной линией показана возможная форма свободной поверхности воды. На границе между жидкостью и трубой зададим условие контактного взаимодействия:  $\mathbf{u}^f \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u}^p \cdot \mathbf{n}$ , где  $\mathbf{u}^f$  и  $\mathbf{u}^p$  — векторы перемещений жидкости и трубы.

Может показаться, что предложенная модель не отражает вязкие свойства разжиженного грунта, однако за счёт связи трубы с вязкой жидкостью модель автоматически приобретает вязкие свойства. Разжиженный грунт, представляющий собой взвесь частиц грунта в морской воде, опишем моделью «тяжёлой» жидкости.

Исходными гидродинамическими параметрами задачи являются глубина воды  $h = 20$  м, амплитуда волн  $A = 3$  м и период спектрального пика  $T_0 = 10$  с. Для удобства численного моделирования волнения воды ширина бассейна выбрана равной длине волн

на мелкой воде для соответствующих параметров  $h$  и  $T_0$  [9]. Для указанных значений  $h$  и  $T_0$  корабельная скорость (скорость распространения уединённой волны с характерной длиной волны  $\lambda$  при глубине воды  $h$ )  $c_0$ , длина волны  $\lambda$  и волновое число  $\xi$ , согласно теории волн на «мелкой» воде, имеют следующие значения:  $c_0 = \sqrt{g \cdot h} = 14,0$  м ( $g$  — ускорение свободного падения);  $\lambda = c_0 T_0 = 140$  м;  $\xi = 2\pi/\lambda$ .

Движение воды в бассейне описывается уравнениями Навье–Стокса:

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho_f (\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[ -p \mathbf{I} + \eta \left( (\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T \right) \right] + \mathbf{F}; \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_f = 1025$  кг/м<sup>3</sup> — плотность морской воды;  $\mathbf{v}$  — вектор скоростей жидкости;  $\eta = 0,001$  Па·с — динамическая вязкость;  $\mathbf{F}$  — вектор объёмных сил;  $\mathbf{I}$  — единичный тензор; «Т» — знак операции транспонирования. Вода находится только под действием гравитационных сил, поэтому вектор объёмных сил имеет вид:  $\mathbf{F} = -\rho_f g \mathbf{k}$ , где  $\mathbf{k}$  — орт вертикальной оси.

Примем, что в начальный момент времени и жидкость, и газопровод неподвижны. Форму поверхности воды зададим кинематическим уравнением вида:  $u_z^f(x, z, t)|_{z=0} = A \cos(\xi x) \sin(2\pi t/T_0)$ , где  $u_z^f$  — вертикальное перемещение частиц жидкости в направлении оси  $z$ ;  $t$  — время. Давление на свободной поверхности положим без учёта атмосферной составляющей:  $p(x, z, t)|_{z=0} = 0$ . На боковых гранях зададим условие симметрии — нормальная компонента скорости и касательные напряжения равны нулю:  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0$ ,  $\boldsymbol{\tau} \cdot \left[ -p \mathbf{I} + \eta \left( (\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T \right) \right] = 0$ , где  $\mathbf{n}$  и  $\boldsymbol{\tau}$  — векторы, нормальный и касательный к границе. Будем считать, что на дне выполняется условие запрета скольжения и проникновения:  $\mathbf{v} = 0$ .

Как правило, сечение газопровода, помимо стальной несущей трубы, состоит из антикоррозионного покрытия, бетонной оболочки, защитной оболочки и так далее. Но ввиду того, что в данной работе интерес представляет динамическое поведение трубы в целом, рассматривается круглое сплошное сечение диаметром 1,2 м. Плотность материала в сечении трубы  $\rho_p$  примем равной плотности окружающей жидкости  $\rho_f$  для обеспечения нейтральной плавучести и отсутствия статического прогиба трубы.

Вертикальное движение сечения трубопровода как жёсткого целого описывается уравнением колебаний одномассовой системы с сухим трением:

$$m \ddot{u}_z^p + F_0 \text{sign}(\dot{u}_z^p) + c u_z^p = \mathbf{k} \cdot \oint p \mathbf{n} dl - mg. \quad (2)$$

Здесь  $m$  — погонная масса трубы, равная  $m = \rho_p S$ , где  $S$  — площадь круглого сечения. Каждому конкретному случаю соотношения параметров  $c$  и  $m$  можно поставить в соответствие значение собственной частоты  $\tilde{\omega} = \sqrt{c/m}$ . Горизонтальные перемещения трубы в силу симметрии нагрузки считаем отсутствующими:  $u_x^p = 0$ .

Таким образом, труба связана с неподвижным основанием двумя элементами — упругим элементом с жёсткостью  $c$ , а также элементом сухого трения с силой сцепления  $F_0$ . Такая постановка позволяет учесть изгибную жёсткость трубопровода, а также его взаимодействие с окружающим грунтом. В результате задача определения полей скоростей, перемещений, давлений в жидкости, а также вертикальной скорости и перемещения сечения газопровода сводится к совместному решению уравнений (1) и (2).

### 3. Конечно-элементное моделирование

Численное моделирование нестационарной задачи выполнено в системе конечно-элементного мультидисциплинарного моделирования COMSOL Multiphysics. Движение

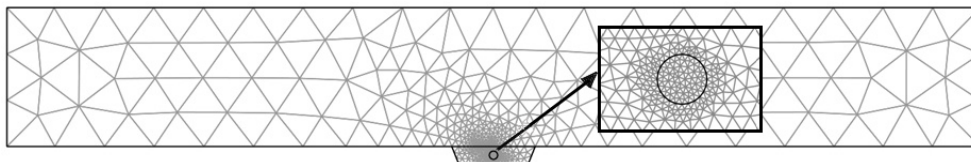


Рис. 2. Вид конечно-элементной сетки

жидкости и твёрдого тела описывается с помощью лагранжева подхода с использованием подвижных сеток. При этом решается связанная посредством граничных условий система уравнений теории упругости и гидродинамики. Свободная поверхность жидкости и граница между трубой и жидкостью являются подвижными.

Для решения системы линейных уравнений используется UMFPACK Direct-метод — несимметричный мультифронтальный метод с прямой LU-факторизацией разреженной матрицы [10]. Нелинейные дифференциальные уравнения решаются итерационным путем. Интегрирование уравнений по времени проводится с помощью явного метода Эйлера. Максимальный шаг по времени не превышает 0,1 с.

На рисунке 2 представлена конечно-элементная сетка для расчётной модели, которая имеет следующие характеристики: тип элементов — Лагранжа, квадратичные; форма элементов — треугольные; число узлов — 545; число элементов — 1014; число степеней свободы — 8757.

На рисунке 3 приведены, соответственно, поля скоростей жидкости, вертикальных перемещений и гидродинамического давления для характерного момента времени  $t = T_0/4 = 2,5$  с в выбранном представительном сечении.

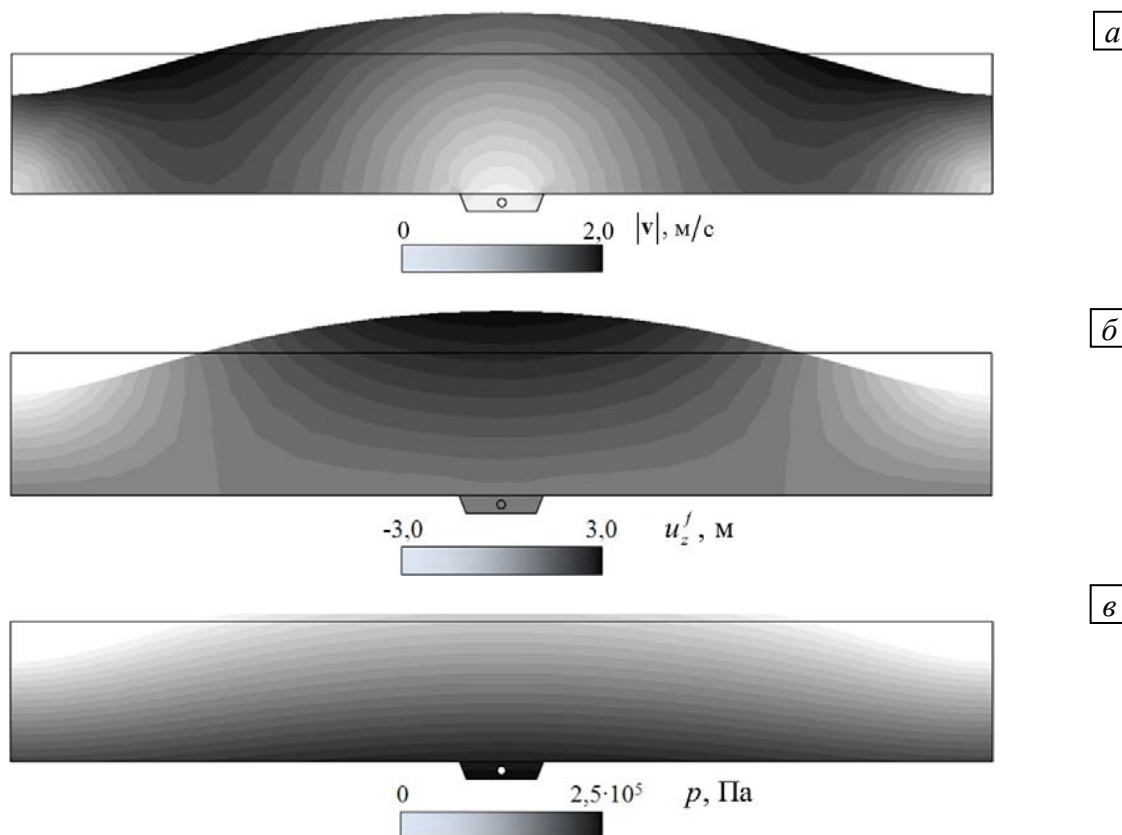
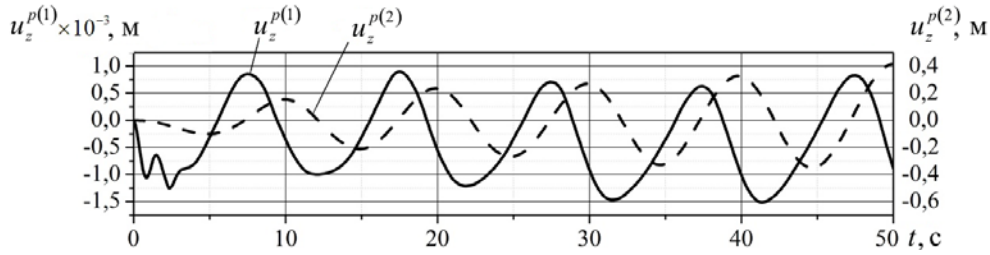
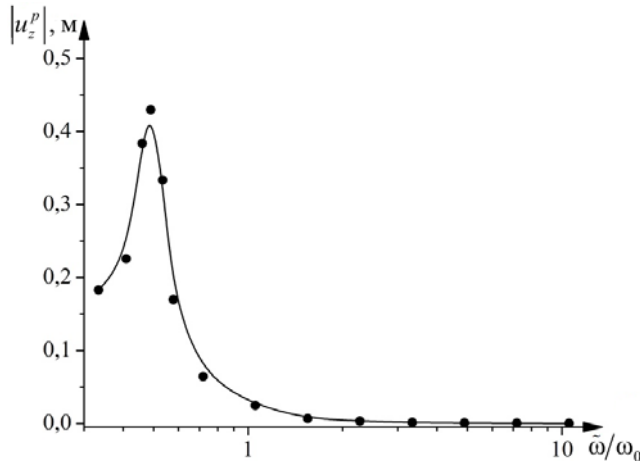


Рис. 3. Параметры жидкости в некоторый характерный момент времени: поле скоростей (а), поле вертикальных перемещений (б); поле гидродинамического давления (в)



**Рис. 4.** Зависимости от времени вертикальной компоненты вектора перемещения сечения трубы  $u_z^p$  для жёсткостей основания  $c^{(1)} = 50 \text{ кН/м}^2$  и  $c^{(2)} = 1 \text{ кН/м}^2$



**Рис. 5.** Амплитудно-частотная характеристика системы без трения

На рисунке 4 показаны зависимости вертикальных перемещений  $u_z^{p(1)}(t)$  и  $u_z^{p(2)}(t)$  газопровода от времени на отрезке от 0 до 50 с для двух различных значений жёсткости основания:  $c^{(1)} = 50 \text{ кН/м}^2$  и  $c^{(2)} = 1 \text{ кН/м}^2$ . Для обоих случаев величина силы сцепления составляет  $F_0 = 0 \text{ Н/м}$ . Анализ приведённых зависимостей говорит о колебательном характере движения газопровода под действием стоячей волны. При первом значении жёсткости на отрезке времени от 0 до 5 с имеет место наложение свободных колебаний на вынужденные. Далее свободные колебания затухают и естественным образом выпадают из рассмотрения. Амплитуда вынужденных колебаний составляет 1 мм. Для второго значения видно нарастание амплитуды колебаний трубы, характерное для резонанса, при этом амплитуда колебаний составляет уже доли метра.

Рисунок 5 содержит амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) для описанной модели без силы сухого трения. АЧХ построена по результатам нескольких численных экспериментов (на рисунке обозначены точками), в которых варьировалась жёсткость основания  $c$ . Сплошной линией обозначен сплайн, проведённый по данным 12 экспериментов. Пик АЧХ соответствует резонансу в системе «труба – движущаяся «тяжёлая» жидкость» при совпадении её собственной частоты с частотой гидродинамического воздействия.

Смещение пика резонанса в сторону более низких частот объясняется эффектом присоединённой массы. Так, для жесткости  $c = 1 \text{ кН/м}^2$ , плотности трубопровода  $\rho_p = 1025 \text{ кг/м}^2$ , равной плотности жидкости в траншее, отношение собственной частоты системы (2) к частоте гидродинамического возбуждения составляет

$$\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0} = \left( \frac{\sqrt{c/m}}{2\pi/T_0} \right)^{-1} = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{\rho_p S}{c}} = 0,67. \quad (3)$$

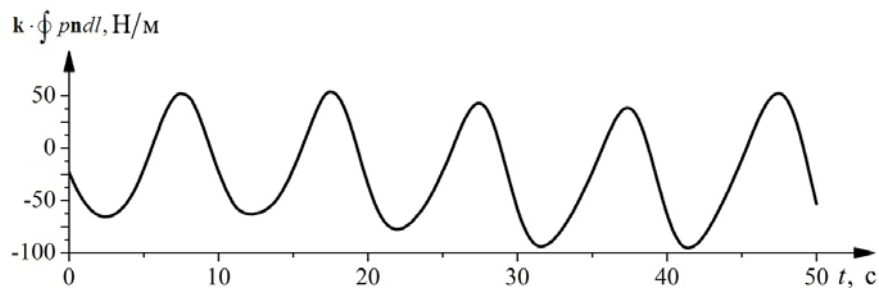


Рис. 6. Зависимость от времени действующей на трубу вынуждающей силы

Как показывает аналитическое решение [11], учёт влияния присоединённой массы «тяжёлой» жидкости в траншее приводит к повышению отношения  $\tilde{\omega}/\omega_0$  до значения, близкого к единице:

$$\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0} = \left( \frac{\sqrt{c/m}}{2\pi/T_0} \right)^{-1} = \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{\frac{\rho_p S + \rho_f \pi R^2}{c}} = 0,96. \quad (4)$$

Таким образом, опираясь на формулы (3) и (4), можно проводить сравнение собственных частот, получаемых с помощью численного решения описанной выше модели и аналитического решения, в котором принимается во внимание присоединённая масса. Разница между результатами составляет не более 5%.

Для исследования влияния силы сухого трения на колебания трубопровода необходимо оценить также уровень гидродинамической нагрузки. В рассматриваемой модели действующая на трубопровод вынуждающая сила является неизвестной функцией и находится в результате решения связанной задачи. Зависимость вынуждающей силы от времени в уравнении (2) для случая неподвижного трубопровода при указанных параметрах глубины воды, амплитуды волн и периода возбуждения волн приведена на рисунке 6. Амплитуда колебаний повторяющейся нагрузки составляет 60 Н/м.

Параметр силы сухого трения  $F_0$  играет важную роль в демпфировании колебаний газопровода, особенно при резонансе. На рисунке 7 представлена зависимость амплитуды колебаний трубы  $u_z^p$  от величины силы сцепления  $F_0$  для резонансного случая при жёсткости основания  $c = 1 \text{ кН/м}^2$ . Точками обозначены результаты конечного числа численных экспериментов, а сплошная линия отображает закономерность зависимости. Пунктирной линией множество точек условно разбито на две области: значениям  $F_0 \in (0; 60) \text{ Н/м}$  соответствует режим раскачки системы; при  $F_0 > 60 \text{ Н/м}$  амплитуда колебаний трубы остаётся постоянной во времени.

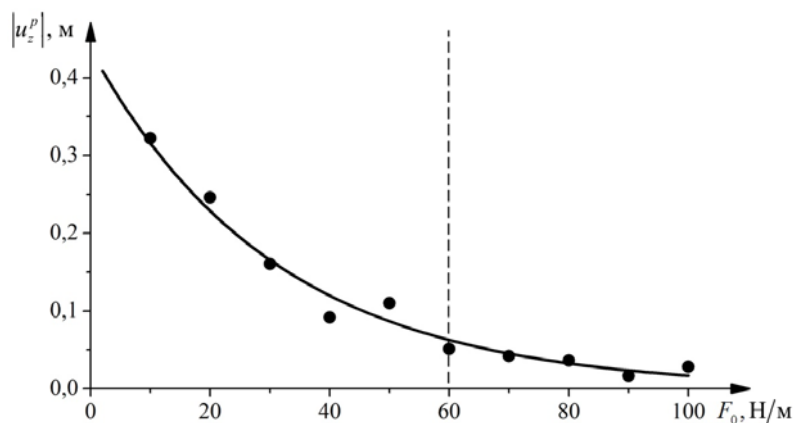


Рис. 7. Зависимость амплитуды колебаний трубы от величины силы сухого трения

#### 4. Заключение

Представлена двухмерная модель подводного газопровода в разжиженном грунте и численно решена задача его колебаний под гидродинамическим воздействием стоячей волны с заданными параметрами. Благодаря мультидисциплинарному подходу рассмотрена связанная задача взаимодействия трубы и «тяжёлой» жидкости.

Предложенная модель позволяет проводить многовариантные расчёты с целью исследования возможности наступления резонансных явлений подводных газопроводов, находящихся в траншеях с разжиженным грунтом.

Показано влияние параметров жесткости основания и силы сухого трения на колебания трубы, а также то, что различные соотношения параметров жёсткости и трения могут приводить как к управляемым колебаниям малых амплитуд, так и к резонансной раскачке газопровода.

#### Литература

1. *Харионовский В.В., Радин В.П.* Рекомендации по оценке работоспособности подводных переходов газопроводов при наличии размывов дна. – М.: ВНИИГАЗ, 1995. – 40 с.
2. *Christian J.T., Taylor P.K., Yen J.K.C., Erali D.R.* Large diameter underwater pipeline for nuclear plant designed against soil liquefaction // Proceeding of Offshore Technology Conf., Houston TX, OTC 2094. – 1974. – P. 597-606.
3. *Herbich J.B., Schiller R.E., Dunlap W.A., Watanabe R.K.* Seafloor scour, design guidelines for ocean-founded structures. Marcel Dekker Inc., New York, 1984. – 320 p.
4. *Sumer B.M., Truelsen C., Fredsøe J.* Liquefaction around pipelines under waves // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE. – 2006. – V. 132, N. 4. – P. 266-275.
5. *Sumer B.M., Hatipoglu F., Fredsøe J., Ottesen Hansen N.E.* Critical flotation density of pipelines in soils liquefied by waves and density of liquefied soils // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE. – 2006. – V. 132, N. 4. – P. 252-265.
6. *Talebbeydokhti N., Afzali E.* Wave induced uplift forces acting on half-buried submarine pipeline in sandy seabed by numerical methods // Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering. – 2008. – V. 32, N. B2. – P. 141-151.
7. *Magda W., Maeno Sh., Nago H.* Wave-induced pore-pressure response on a submarine pipeline buried in seabed sediments // Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University. – 1998. – V. 3, N. 1. – P. 75-95.
8. *Индейцев Д.А., Осипова Е.В.* Нелинейные эффекты в ловушечных модах колебаний стоячих волн на поверхности мелкой воды // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, № 12. – С. 1-5.
9. *Уизем Дж.* Линейные и нелинейные волны. – М.: Мир, 1977. – 624 с.
10. *Davis A.T.* A column pre-ordering strategy for the unsymmetric-pattern multifrontal method // Transactions on Mathematical Software, ACM. – 2004. – V. 30, N. 2. – P. 165-195.
11. *Короткин А.И.* Присоединенные массы судостроительных конструкций. – СПб.: Мор Вест, 2007. – 448с.

Поступила в редакцию 10.03.11

---

#### Сведения об авторах

*Гилёв Евгений Евгеньевич*, асп., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, E-mail: gilyov@compmechlab.com

*Шубин Сергей Николаевич*, асп., СПбГПУ; E-mail: shubin@compmechlab.com

*Боровков Алексей Иванович*, ктн, проф., исполнительный директор ОНТИ НИУ СПбГПУ; E-mail: borovkov@compmechlab.com

*Абрамян Андрей Карэнович*, дтн., проф., внс, Институт Проблем Машиноведения РАН (ИПМаш РАН), 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. ВО, д. 61; E-mail: andabr55@gmail.com