

А.В. Малахов, д-р физ.-мат. наук,**В.В. Леонов, канд. техн. наук,****С.Н. Старостин, Ф.А. Бендеберя**

Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина

С.В. Зуев,**И.З. Маслов**

Одесская национальная морская академия, Одесса, Украина

ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И СЕПАРАЦИЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ СУДОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

TRANSPORTATION AND SEPARATION OF MULTIPHASE FLOWS UNDER CONTIONS OF WATER TRANSPORT'S FLEET WORKING

Рассмотрена проблема повышения качества работы судов дноуглубительного флота. Выполнено описание предложенной технологии гидроразмыва, не требующей изменения конструкции судна. Показано, что повышение производительности дноуглубительного судна по добываемой пульпе может быть достигнуто путем использования гидравлического способа выработки грунта, базирующегося на размыве струями воды поверхности массива грунта и последующем его всасывании в грунтоприемник. Приведены значения нормативных величин давления струи на грунтовые основания. Рассмотрены физические принципы работы гибких трубопроводов и приведен расчет осевой реактивной силы на выходе из конусного насадка. Показано, что предлагаемое техническое решение может существенно повлиять на процесс всасывания несвязного грунта и существенно изменить динамическое поведение внешнего контура поля изотакх вблизи входного сечения грунтоприемника.

Ключевые слова: судно дноуглубительного флота, гидродинамическая система размыва грунта, гибкий трубопровод, реактивная сила, конусная насадка, амплитуда колебаний трубопровода, частота отрыва вихрей.

Введение

В настоящее время проблема повышения качества работы судов дноуглубительного флота напрямую определяется не только производственно-техническими показателями судна, но и используемыми технологиями проведения работ по самому дноуглублению.

Приоритетным направлением при техническом решении рассматриваемой проблемы может выступать создание локальных технологий, не требующих изменения конструкции судна. Они должны быть направлены на модернизацию отдельных технологических участков судна, например, линии грунтозабора со дна разрабатываемой пролези (при добыче грунта) или линии забора грунта из трюма (при его выгрузке).

В судовых системах грунтозабора чаще всего используются механические разрыхлители (фрезы, буры, черпаки, сваи и т.д.) и гидравлические грунтоприемники. В силу простоты конструкции и высокого качества работы гидравлические грунтозаборные устройства могут рассматриваться как более перспективные. Поскольку для добычи песчаных и илистых грунтов чаще всего применяется нерегулируемый эллиптический грунтоприемник, то его конструкция была принята в качестве базовой для проведения исследований по технологической модернизации.

Гидравлический способ выработки грунта основывается на размыве струями воды поверхности массива грун-

та и последующем его всасывании в грунтоприемник. В ходе исследований была разработана импульсная система подачи жидкости для разрушения поверхностного слоя грунта. Ее работа основана на создании во вспомогательном трубопроводе волн ударного давления, которые в последующем через систему сопловых насадок подаются на поверхность разрабатываемого грунтового участка.

Основные результаты исследования

В предлагаемой импульсной системе гидроразмыва предполагается использование прямого гидравлического удара. С точки зрения надежности работы системы гидроразмыва важное значение имеет конструкция клапанов, которые выбираются для создания волн ударного давления. Достаточно полный обзор их конструкций выполнен в работе [3].

Производительность земснаряда должна определять величину ударного давления, которое необходимо создавать в линии грунторазабора. Согласно работе [2] это давление должно соответствовать данным о величине нормативного давления на грунтовые основания. Эти значения приведены в таблице 2, и их анализ показывает, что максимальное нормативное давление составляет величину всего 0,45 МПа.

Основные проблемные вопросы, которые могут влиять на качество работы импульсной системы гидрораз-

Таблица 1— Нормативные давления на основания из песчаных грунтов, МПа [2]

Вид грунта	Плотный грунт	Грунт средней плотности
Глинистый грунт	0,25	-
Пески гравистые и крупные	0,45	0,35
Пески средней крупности	0,35	0,25
Пески мелкие	0,25	0,15
Пески пылеватые	0,25	0,2

мыва, связаны с гидроупругостью — возникновением нарастающих колебаний гибкого трубопровода при определенных скоростях потока. Такие задачи являются неконсервативными, поскольку действующие на стенки гибкой трубы гидродинамические силы зависят от упругих деформаций стенок трубы при изгибе. При пространственно криволинейной форме внутренний поток жидкости внутри трубы нагружает гибкий трубопровод как статическими, так и динамическими силами.

В связи с этим давление в потоке жидкости внутри гибкого трубопровода необходимо рассматривать в виде суммы трех составляющих

$$P = P_0 + P_1 + P_2, \quad (1)$$

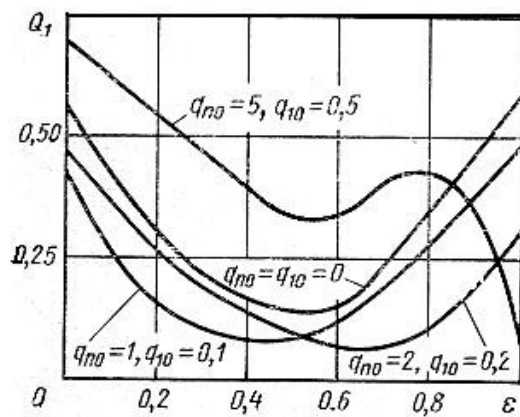
где P_0 — давление в неподвижном трубопроводе при движении жидкости на стационарном режиме, P_1 — дополнительное давление в жидкости при неподвижном трубопроводе, которое вызывается работой нагнетательного оборудования (насоса, компрессора, турбины и т.д.), P_2 — давление, которое возникает в потоке из-за переносных сил инерции, т.е. от колебания трубопровода.

При рассмотрении физических принципов работы гибких трубопроводов, подвергаемых внешним воздействиям со стороны окружающей среды, следует учитывать возможность перехода при определенной комбинации критических параметров системы к неустойчивым колебаниям. Обычно такая система характеризуется наличием нескольких степеней свободы с периодически изменяющимися коэффициентами в линейных уравнениях колебательного движения.

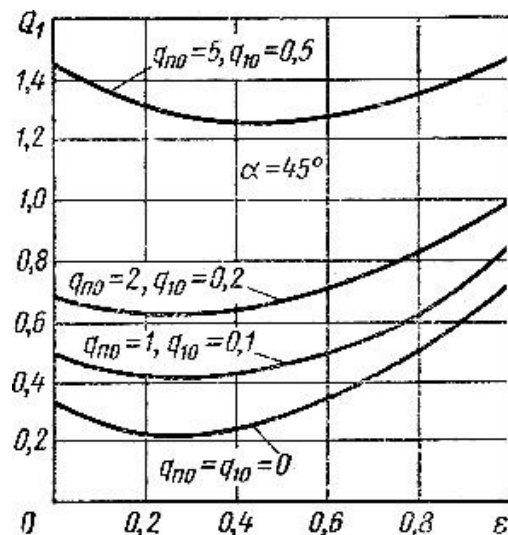
Согласно результатам работы [4] характер крепления концов гибкого трубопровода оказывает существенное влияние на возникающие в них в последующей эксплуатации осевые усилия. Зависимости подвержены также и максимальные значения осевых усилий. Этот вывод наглядно демонстрируется рисунком 1, на котором для угла атаки потока $\alpha = 45^\circ$ показаны соответствующие равновесным формам гибких трубопроводов зависимости осевых усилий Q_1 от безразмерной координаты их смещения $\varepsilon = S/l$ (смещение гибкого трубопровода по отношению к его длине). Показанные на рисунках 1а и 1б четыре графика соответствуют различным амплитудным значениям безразмерных аэродинамических сил q_i .

Согласно результатам работы [4] возникающие колебания гибкого трубопровода с плохообтекаемым профилем являются самовозбуждающимися и относятся следовательно к автоколебаниям, как при безотрывном, так и при отрывном обтекании.

В том случае, когда обтекается подвижный гибкий трубопровод, частота срыва вихрей с его поверхности h линейно зависит от скорости потока. В режимах докризисного обтекания среднее значение числа Струхала при $40 < Re < 105$ составляет $Sh = 0,2$.



а



б

Рисунок 1 — Осевые усилия в гибких трубопроводах [4]: а — безразмерная начальная и конечная нагрузки соответственно равны: $X_{1к} = 0,5$; $X_{2к} = 0$; б — безразмерная начальная и конечная нагрузки соответственно равны: $X_{1к} = 0,7$; $X_{2к} = 0,4$.

Согласно результатам экспериментальных исследований [5], если наблюдается синхронизация частоты срыва вихрей с частотой свободных колебаний гибкого трубопровода, то она сохраняется и с ростом скорости набегающего потока. Предел по скорости приближенно составляет $1,25V$. В этом случае будет иметь место рост амплитудного значения сил Кармана. Его величина может вырасти до 50 %.

В случае, когда потоком поперечно обтекается закрепленный, упруго подвешенный круглый трубопровод (угол атаки составляет 90°) зависимость между частотой схода вихрей с поверхности цилиндра и скоростью набегающего потока изменяется. Качественная картина такого изменения хорошо иллюстрируется графиками, взятыми из работы [4]. Они показаны на рисунке 2 и отображают качественный характер изменения частоты срыва вихрей с поверхности подвижного трубопровода.

На рисунке 2, а видно, что при определенных значениях скорости потока V_{0i} имеет место синхронизация частоты срыва вихрей с собственной частотой колебаний трубы ω .

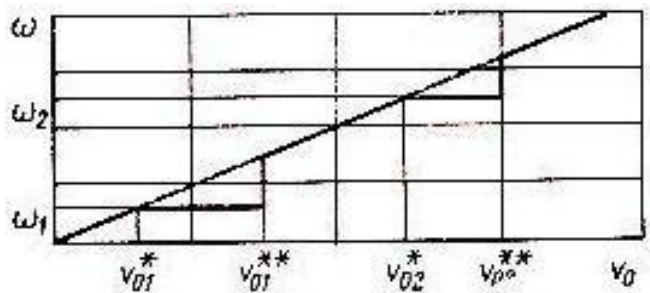
В интервалах скоростей, при которых наступает синхронизация частот, наблюдается резкое возростание амплитуд поперечных колебаний x_{20} гибкого трубопровода. Это хорошо видно на рисунке 2, б, где изображено качественное изменение этого процесса. В работе [4] показано, что если трубопровод является упругим, т.е. имеет несколько степеней свободы, то явление синхронизации частоты срыва вихрей и собственной частоты трубопровода повторяется. Скорость потока V_{0i} , соответствующая началу синхронизации срыва вихрей с трубопровода с его собственной частотой колебаний ω , можно установить из условия

$$\vartheta_i = \omega = 0,2 \frac{V_{0i}}{d}, \quad (2)$$

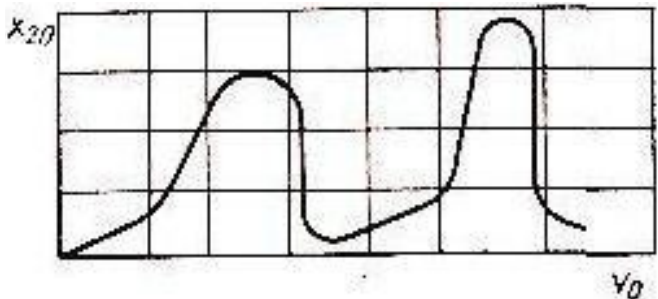
где ϑ_i — собственная частота колебаний трубопровода, d — диаметр трубопровода.

Очень важными элементами в импульсной системе размыва грунта являются сопловые насадки. В зависимости от геометрии насадки при истечении рабочей струи могут возникать различные величины реактивной силы. Действие такой силы на систему креплений и на гидроупругость навесной линии импульсного гидроразмыва в совокупности с весовыми нагрузками является негативным, но правильно выбранная геометрия насадки позволит увеличить силу действия потока струи на грунт. Пример расчетной схемы простейшего насадка изображен на рисунке 3.

В первом приближении реактивную силу F можно определить на основании следующих исходных данных: избыточное давление на входе в суживающуюся часть насадка составляет P_1 , расход жидкости на входе в насадок Q , коэффициент местных потерь насадка ζ , диаметры входного и выходного сечений насадка соответственно равны d_1 и d_2 .



а



б

Рисунок 2 — Изменение частоты срыва вихрей со стержня [4]: а — подвижный стержень; б — упругий стержень

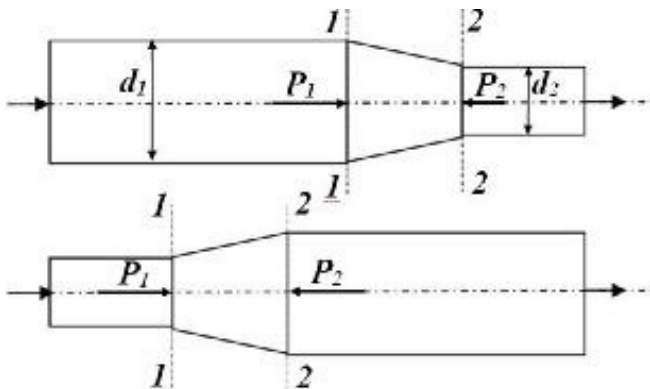


Рисунок 3 — Расчетная схема для определения реактивной силы на насадке

В этом случае с учетом известного расхода и площадей поперечных сечений насадка S_1 и S_2 находятся соответствующие скорости течения

$$V_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2}, \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2}. \quad (4)$$

Затем определяется потеря напора на насадке

$$h_n = \zeta \frac{V_2^2}{2g}, \quad (5)$$

и из уравнения Бернулли, записываемого с учетом равенства входного и выходного геометрического напоров,

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + h_n, \quad (6)$$

находится давление P_2

$$P_2 = P_1 - \rho g h_n - \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2). \quad (7)$$

Искомая осевая реактивная сила, приложенная к оси симметрии насадка, будет равна

$$F = \rho Q (V_1 - V_2) + P_1 S_1 - P_2 S_2. \quad (8)$$

Интересным является случай изменения направления движения в насадке, который показан в нижней части рисунка 3. В таком насадке поток вытекает не из конусной, а наоборот из диффузорной части. Реактивная сила, с учетом входной и выходной площади S_1 и S_2 , будет определяться по описанному выше алгоритму и составлять

$$F = \rho Q (V_2 - V_1) + P_2 S_2 - P_1 S_1. \quad (9)$$

Сравнение выражений (8) и (9) показывает, что сила F численно не изменяется и только ее знак меняется на противоположный, а, следовательно, в местах соединения сопловой насадки с системой подачи рабочей жидкости будут возникать дополнительные повышенные нагрузки порядка F/g . Если форму сопла изменить на зеркально противоположную (т.е. поменять направление движения потока в насадке), то знак поменяется и эти нагрузки уже будут оказывать положительное влияние на систему механического крепления.

Помимо реактивной силы важным вопросом является нахождение порогового значения величины ударного давления. В этом случае можно воспользоваться результатами работы [1], в которой показано, что для каждой температуры жидкости существует критическое отношение давление $(P_2/P_1)_{кр}$, ниже которого в сопловых насадках не происходит увеличение скорости истечения. Таким образом, при расчете ударного давления при гидроударе ниже пороговое значение величины развиваемого ударного давления P_2 всегда будет известно и с инженерной точки зрения нет необходимости его превышать.

В заключение следует отметить, что предлагаемое техническое решение может существенно повлиять на процесс всасывания несвязного грунта и существенно изменить динамическое поведение "сферы всасывания" т.е. внешнего контура поля изотакх вблизи входного сечения грунтоприемника. За счет перекрестного силового взаимодействия ударных струй с поверхностью грунта скорость его размыва всегда будет максимальной вне зависимости от величины щелевого зазора между грунтом и грунтоприемником. Для поддержания на высоком уровне величины консистенции грунта в пульпе направление ударных волн должно всегда совпадать с направлением движения всасывающего трубопровода.

Выводы

1. Все механические системы, работающие на принципе контактного разрушения грунта по своим показателям скорости изменения ударной нагрузки не сопоставимы с гидравлическими системами размыва. В отличие от гидравлической системы размыва грунта они являются узкоспециализированными и могут эффективно применяться только при разработке определенных классов грунтов.
2. Достоинством предложенной импульсной системы гидроразмыва грунта является возможность изменения ее настроек непосредственно во время эксплуатации. Из-за несжимаемости жидкости величины импульсных скачков давления в широких пределах изменений будут передаваться практически мгновенно.

Литература

1. Абрамович, Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. — М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. — 715 с.
2. Бородулин, Я.Ф. Дноуглубительный флот и дноуглубительные работы / Я.Ф. Бородулин, Б.Н. Сущенко Б.Н. — М.: Транспорт, 1973. — 432 с.
3. Кондратьева, Т.Ф. Предохранительные клапаны / Т.Ф. Кондратьева. — Л.: Машиностроение, 1976. — 232 с.
4. Светлицкий, В.А. Механика трубопроводов и шлангов / В.А. Светлицкий. — М.: Машиностроение, 1982. — 280 с.
5. Цай, Н. Анализ нелинейного неустановившегося движения тросов с использованием метода диаграмм связи / Н. Цай // Труды Американского общества инженеров-механиков. Прикладная механика. — 1972. — Т. 94, № 2, сер. В. — С. 1—8.
6. Onorati, A. Modeling of 1-D Unsteady Flows in I.C. Engine Pipe Systems: Numerical Methods and Transport of Chemical Species / A. Onorati, G. Ferrari — 1998. — 14 p.
7. Tang, H.S. A Second-Order Accurate Capturing Scheme for 1D Inviscid Flows of Gas and Water with Vacuum Zones / H.S. Tang, D. Huang // Journal of Computational Physics. — 1996. — # 128. — P. 301-318.
8. Flannigan, D.J. Molecular and atomic emission during single-bubble cavitation in concentrated sulfuric acid Acoustics / D.J. Flannigan, K.S. Suslick // Research Letters Online. — 2005. — V. 6, № 3. — P. 157—161.

References

1. Abramovich, G.N. Teoriya tyrbulentnih strui / G.N. Abramovich. — M.: Izd. phis.-mat. lit., 1960. — 715 p.
2. Borodulin, Y.F. Dnougлубitelnyy flot i dnougлубitelnye raboti / Y.F. Borodulin, B.N. Suchenko. — M.: Transport, 1973. — 432 p.
3. Kondratieva, T.F. Predohranitelnye klapani / Kondratieva T.F. — L.: Mashinostroenie, 1976. — 232 p.
4. Svetlitskiy, V.A. Mehanica truboprovodov i shlangov / V.A. Svetlitskiy. — M.: Mashinostroenie, 1982. — 280 p.

5. Tsai, N. Analiz nelineinogo neustanovivshegosya dvijeniya trosov s ispolzovaniem metoda diagram svyazi / N. Tsai // Trudi Americanskogo obchestva injenerov-mehaniikov. Prikladnaya mehanika. — 1972. — T. 94, № 2, ser. B. — P. 1-8.

6. Onorati A. Modeling of 1-D Unsteady Flows in I.C. Engine Pipe Systems: Numerical Methods and Transport of Chemical Species / A. Onorati, G. Ferrari — 1998. — 14 p.

7. Tang H.S. A Second-Order Accurate Capturing Scheme for 1D Inviscid Flows of Gas and Water with Vacuum Zones / H.S. Tang, D. Huang // Journal of Computational Physics. — 1996. — # 128. — P. 301—318.

8. Flannigan D.J. Molecular and atomic emission during single-bubble cavitation in concentrated sulfuric acid Acoustics / D.J. Flannigan, K.S. Suslick // Research Letters Online. — 2005. — V. 6, № 3. — P. 157—161.

Надійшла 30.05.2013

УДК 629.123

**ТРАНСПОРТУВАННЯ І СЕПАРАЦІЯ
БАГАТОФАЗНИХ ПОТОКІВ В УМОВАХ
РОБОТИ СУДЕН ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ**

**О.В. Малахов, В.В. Леонов,
С.Н. Старостін, Ф.А. Бендеберія,
С.В. Зуєв, И.З. Маслов**

У статті розглянуто проблему підвищення якості роботи суден днопоглиблювального флоту. Виконано опис запропонованої технології гідророзмиву, яка не потребує зміни конструкції судна. Показано, що підвищення продуктивності днопоглиблювального судна щодо здобутої пульпи може бути досягнуто шляхом використання гідравлічного способу розробки ґрунту, заснованого на розмиві струменями води поверхні масиву ґрунту і його подальшому всмоктуванні в ґрунтоприймач. Наведені значення нормативних величин тиску струменя на ґрунтові основи. Розглянуто фізичні принципи роботи гнучких трубопроводів і описан розрахунок осьової реактивної сили на виході із конусного насадка. Показано, що запропоноване технічне рішення може істотно вплинути на процес всмоктування незв'язного ґрунту і суттєво змінити динамічну поведінку зовнішнього контуру поля ізотак поблизу вхідного перетину ґрунтоприймача.

Ключові слова: судно днопоглиблювального флоту, гідродинамічна система розмиву ґрунту, гнучкий трубопровід, реактивна сила, конусний насадок, амплітуда коливань трубопроводу, частота відриву вихорів.

УДК 629.123

**TRANSPORTATION AND SEPARATION
OF MULTIPHASE FLOWS UNDER CONTIONS
OF WATER TRANSPORT'S FLEET WORKING**

**A.V. Malakhov, V.V. Leonov,
S.N. Starostin, F.A. Bendeberia,
S.V. Zuev, I.Z. Maslov**

In the paper there was considered the improvement problem of the working quality of dredging fleet. There was done a description of the proposed flow-jet technology which does not require the change in the ship design. It is shown that the increase in productivity of dredgers in pulp production can be achieved by means of the use of hydraulic power generation method based on the soil erosion by water jets and its subsequent absorption in the sample receiver. There were depicted the values of the normative jet pressures onto the groundwater basement. There were considered the physical principles of flexible pipelines exploitation and presented the calculation of the axial reaction force at the outlet of the conical nozzle. It was shown that the proposed solution can significantly affect the absorption process of non-cohesive soil and significantly change the dynamic behavior of the outer contour of the field of isotachs near the inlet section of the sample receiver.

Key words: ship of dredging fleet, the hydrodynamic system for soil erosion, flexible pipeline, force of reaction, cone nozzle, pipe vibration amplitude, frequency of vortex shedding.