

УДК 629.123

Зуев С.В., Маслов И.З., Калуев А.Г.
ОНМА

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ РАЗМЫВА ГРУНТА НА СУДАХ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНОГО ФЛОТА

Основным параметром, влияющим на продолжительность выборки грунта при работе судов дноуглубительного флота, является скорость грунтозабора, которая в первую очередь зависит от физических свойств разрабатываемого грунтового основания [1]. Аналогичная проблема имеет место и при выгрузке грунта из трюма, когда по причине производственных или погодных факторов гранулометрический состав грунта или его прочность претерпевают изменение [2].

Универсальным решением проблемы грунтозабора может являться разработанная конструкция узла гидравлического размыва, которая должна устанавливаться, как дополнительный технологический элемент непосредственно на судовом всасывающем трубопроводе. Как видно на схематическом рисунке 1 ее главными элементами являются насос 1, линия подачи 2, задвижка 3 и система сопловых насадок 4. Основной принцип ее работы основывается на создании с определенной периодичностью волн повышенного давления. Рабочая жидкость двигаясь со скоростью ударной волны на выходе из насадков направленным фронтом воздействует на разрабатываемый поверхностный слой в результате чего он разрыхляется [3]. За счет силового взаимодействия струи с грунтом его консистенция в пульпе на входе в грунтоприемное отверстие будет резко возрастать.

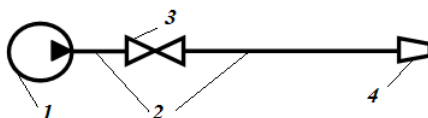


Рис. 1. Принципиальная схема системы размыва грунта

1- насос, 2- вспомогательный трубопровод, 3- задвижка, 4- система сопловых насадок

Работа системы гидравлического размыва предполагает использование только прямого гидравлического удара [4]. При прямом

гидравлическом ударе время закрытия задвижки должно находиться как

$$t_3 < t_0 = \frac{2l}{c} \quad (1)$$

где t_0 – фаза гидравлического удара; l – длина трубопровода, м; c – скорость распространения ударной волны, м/с.

В выражении (1) присутствует скорость распространения ударной волны, которая является одним из ключевых параметров для проектирования импульсной системы гидроразмыва. Классическая формула для ее нахождения имеет вид

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{2\rho R}{\delta E}}} \quad (2)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³; K – объемный модуль упругости рабочей жидкости, Н/м²; R , δ – радиус и толщина стенки трубы, м; E – модуль Юнга материала из которого изготовлен трубопровод.

При помощи скорости ударной волны можно найти величину ударного давления по формуле Жуковского [5]

$$\Delta P_{уд} = \rho V_0 c \quad (3)$$

где V_0 – скорость рабочей жидкости в момент закрытия задвижки, м/с.

В ходе исследований в реальных судовых условиях было установлено, что в применении к разработанной системе гидравлического размыва формула (3) дает завышенные результаты. В судовых условиях величина скачка давления при гидравлическом ударе была всегда ниже. Замеры ударного давления производились непосредственно на срезе сопловой насадки, являющейся конечной точкой в изучаемой системе гидравлического размыва грунта.

На основании большого числа замеров для учета влияния реальных условий эксплуатации было предложено использование двух дополнительных поправочных эмпирических коэффициентов - k_1 и k_2 .

Первый коэффициент k_1 позволяет учитывать все конструктивные характеристики используемого трубопровода и условия его эксплуатации.

Поскольку гидравлическая линия, предназначенная для передачи энергии гидравлического удара в основном состоит из гибкого трубопровода, то свойства эластичности его стенок оказывают отрицательное влияние на получаемую величину ударного давления. В результате разность между расчетным и реальным давлением на выходе из трубопровода может достигать до 30 % в случае армированных резиновых трубопроводов и до 24 % в случае трубопроводов из мягкого пластика. Численное значение коэффициента k_2 находится в диапазоне $k_2=0,84-0,92$. Большие значения должны выбираться для трубопроводов с более высокими значениями модуля Юнга.

Использование второго коэффициента k_2 позволяет учитывать потери давления в конце рабочей линии, т.е. на участке установки набора сопловых насадок. В основном эти потери возникают из-за разделения основного потока на ряд парциальных струй перед каждым соплом. В том случае, когда используются конические насадки с углом конусности $\alpha = 15 - 25^\circ$ величина коэффициента k_2 должна выбираться по экспериментальному графику, показанному на рисунке 2.

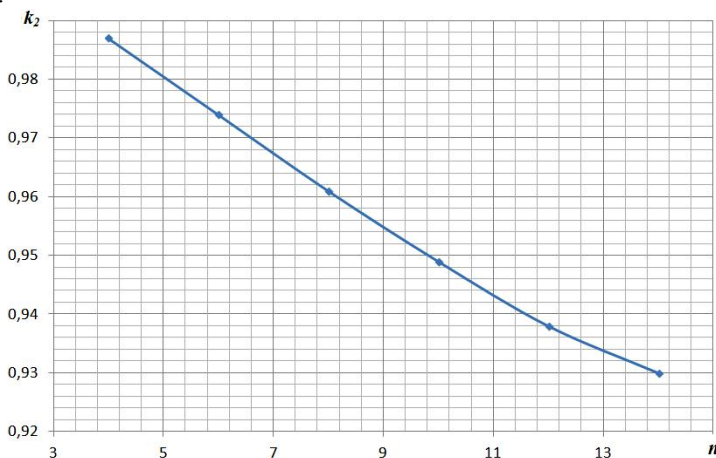


Рис. 2. Зависимость поправочного коэффициента k_2 от числа насадок

Таким образом, выражение (3) при проведении расчетов необходимо использовать в следующем виде

$$\Delta P_{y\partial} = k_1 k_2 \rho V_0 c \quad (4)$$

Потери давления на сопловой насадке можно рассчитать по выражению

$$\Delta P_{нас} = \zeta \frac{\rho V_0^2}{2} \quad (5),$$

где ζ – коэффициент местных потерь.

Величина ζ для сопловой насадки, показанной на рисунке 3 рассчитывается как

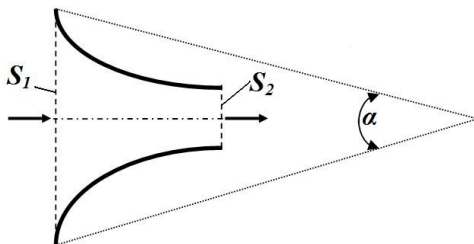


Рис. 3. Схема конусной сопловой насадки

$$\zeta = \frac{\lambda_t}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (6),$$

где λ_t – коэффициент гидравлического трения внутри сопловой насадки; α – угол конусности сопловой насадки, град; n – степень конфузорности, равная отношению поперечных плоскостей на входе и выходе из насадки.

В соответствии с рис. 3 степень конфузорности рассчитывается как

$$n = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad (7)$$

Главным достоинством выражения (7) является возможность выбора оптимального угла конусности сопловой насадки для конкретно заданных значений динамических характеристик потока. Так, если известна скорость потока и его кинематическая вязкость, то возможно по расчетной диаграмме, показанной на рисунке 4 выбрать такой угол конусности, который обеспечит минимальные по-

тери давления в ней. График был построен расчетным путем для основного диапазона рабочих скоростей потока, которые могут быть созданы в гидравлической линии размыва грунта, т.е. от 1 до 10 м/с. Нижняя кривая на рис. 4 соответствует скорости $V=1$ м/с, а верхняя $V=10$ м/с, при этом все полученные результаты соответствует безкавитационному режиму истечения рабочей жидкости из насадки.

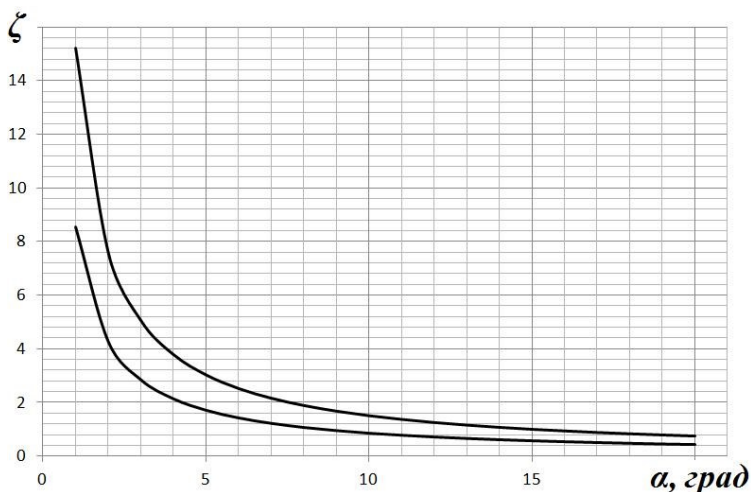


Рис. 4. Влияние угла конусности сопла на коэффициент местных потерь при различных скоростях потока

Стартовое давление, которое должна развивать система размыва грунта согласно данным работы [1] будет всегда соответствовать данным о величине нормативного давления на основании из песчаных и глинистых грунтов. Эти цифры приведены в таблице 1 и их анализ показывает, что система гидроразмыва не должна обладать высоким давлением выходной струи. Максимальное нормативное давление составляет всего 0,45 МПа. Это, в свою очередь, позволяет использовать небольшие диаметры рабочих линий системы гидроразмыва и использовать докавитационные режимы истечения рабочей жидкости из сопловых насадок.

Таблица 1. Нормативные давления на основания из песчаных грунтов, МПа.

Вид грунта	Плотный грунт	Грунт средней плотности
Глинистый грунт	0,25	-
Пески гравелистые 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

При взаимодействии струи жидкости набегающей на грунтовое основание с давлением $\Delta P_{y0} + P_0$ (P_0 – давление рабочей жидкости, развиваемое судовым насосом до гидравлического удара) задача о взаимодействии струи с поверхностью разрабатываемого грунта без значительной потери точности может быть рассмотрена, как задача о взаимодействии струи, вытекающей из отверстия или насадка с неподвижной стенкой. В этом случае давление струи на грунт, имеет вид

$$P = \frac{\gamma}{g} QV \quad (8)$$

где γ – удельный вес, H/m^3 ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; Q – объемный расход рабочей жидкости, m^3/c ; V – осевая скорость струи, m/c .

Из теории струй известно, что величина давления струи изменяется по мере удаления от среза насадка [6]. С увеличением расстояния струя рассеивается и давление в ней уменьшается. Сама струя обычно рассматривается, как комбинация трех локальных участков:

- компактный участок с четко локализованными в пространстве границами струи и параболической эпюрой скорости без участков, характерных для изломов сплошности;

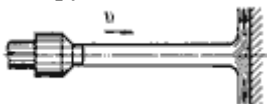
- переходный участок с присутствием зоны перемешивания границ струи с окружающей жидкостью и постепенным расширением фронта струи;

- распыленный участок, характеризующийся отсутствием четких границ и распадом струи на отдельные участки.

При работе судов дноуглубительного флота вследствие различного рельефа дна могут возникать различные варианты геометрической конфигурации поверхности силового взаимодействия ”поток-стенка”.

К характерным примерам и соответствующим им расчетным соотношениям, получаемых на основе анализа баланса сил и выражения (8) можно отнести следующие:

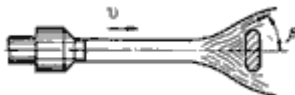
3 Струя набегает на плоскую стенку:




$$P = \frac{\gamma}{g} QV \quad (9)$$

2. Струя набегает на конусную стенку

$$P = \frac{\gamma}{g} QV (1 - \cos \beta) \quad (10)$$

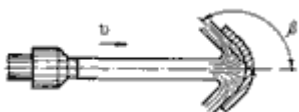


3 Струя набегает на овальную стенку



$$P = \frac{\gamma}{g} QV (1 - \cos \beta) \quad (11)$$

4. Струя набегает на стенку, обращенную против потока под углом β



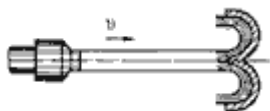
$$P = \frac{\gamma}{g} QV (1 + \cos \beta) \quad (12)$$

5. Струя набегает на плоскую стенку с загнутыми против потока краями



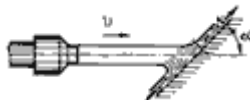
$$P = \frac{2\gamma}{g} QV \quad (13)$$

6. Струя набегает на вогнутую стенку с разворотом на угол 180°



$$P = \frac{2\gamma}{g} QV \quad (14)$$

7. Струя набегаёт на плоскую стенку, наклонённую по отношению к оси струи под углом α



$$P = \frac{\gamma}{g} QV \sin \alpha \quad (15)$$

С учетом всех вышеизложенных соотношений возможно выполнить оценку основных инженерных характеристик судовой системы гидравлического размыва грунта.

Выводы

1. При работе судов дноуглубительного флота скорость грунтозабора напрямую зависит от таких физических свойств разрабатываемого грунтового основания, как гранулометрический состав и прочность.

2. Универсальным решением проблемы грунтозабора может являться разработанная конструкция узла гидравлического размыва, которая должна устанавливаться, как дополнительный технологический элемент непосредственно на судовом всасывающем трубопроводе. Работа системы гидравлического размыва предполагает использование только прямого гидравлического удара и безкавитационного истечения рабочей жидкости из системы сопловых насадок.

3. Экспериментально установлено, что величина ударного давления, получаемая по формуле Жуковского даёт завышенные результаты. По этой причине при расчете предложенной конструкции системы гидроразмыва в ней необходимо использовать два дополнительных поправочных коэффициента k_1 и k_2 .

Первый коэффициент k_1 позволяет учитывать все конструктивные характеристики используемого трубопровода и условия его эксплуатации, а второй коэффициент k_2 позволяет учитывать потери давления в конце рабочей линии, т.е. на участке установки набора сопловых насадок.

4. Задача о взаимодействии струи с поверхностью разрабатываемого грунта без значительной потери точности может быть рас-

смотрена, как задача о взаимодействии струи, вытекающей из отверстия или насадка с неподвижной стенкой. Для различных вариантов такого взаимодействия сформулированы выражения для определения величины давления на грунтовое основание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин Я. Ф. Дноуглубительный флот и дноуглубительные работы / Я. Ф. Бородулин, Б. Н. Сущенко. – М. : Транспорт, 1973. – 432 с.
2. Жарницкий Е. П. Землесосные снаряды с погруженными грунтовыми насосами / Е. П. Жарницкий. – М. : Недра 1988. – 143 с.
3. Бебчук А. С. К вопросу о механизме разрушения твердых тел / А.С.Бебчук // Акустический журнал. – 1957. – Т. 3, № 1. – С. 90–91.
4. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев – М.: Мир, 1982. – 423 с.
5. Гийон М. Исследование и расчет гидравлических систем / Гийон М. – М.: Мир, 1964. – 388 с.
6. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй – Г. Н. Абрамович. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. – 715 с.