

УДК 629.123

С.Н. Старостин

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА  
В КАВИТАЦИОННОМ СЕПАРАТОРЕ СУДОВЫХ ЛЬЯЛЬНЫХ ВОД**

*Для гидродинамического метода сепарации многофазных потоков на основе процесса суперкавитации рассмотрена инженерная методика расчета рабочего процесса. Сформулирована технологическая схема изменения производительности судового сепаратора.*

**Ключевые слова:** многофазный поток, сепарация, кавитатор.

*Для гідродинамічного методу сепарації багатозфазних потоків на основі процесу суперкавітації розглянута методика розрахунку робочого процесу. Сформульована технологічна схема зміни продуктивності суднового сепаратора.*

**Ключові слова:** багатозфазний потік, сепарація, кавітатор.

*For the fluid dynamics method of multiphase flows separation on the base of supercavity process there was considered the methodic of working process calculation. For ship's bilge water separator the technological scheme for production variation was formulated.*

**Keywords:** multiphase flow, separation, cavitator.

Для решения проблемы сепарации многофазной смеси нефтепродуктов с водой в условиях работы судна в ходе выполненных исследований был предложен метод сепарации на основе гидродинамического процесса суперкавитации. Разработанная конструкция судового сепаратора базировалась на создании кавитационной суперкаверны внутри спрофилированной рабочей камеры и постоянном отборе водяного пара из нее.

Кавитатор представляет собой плоскую трубу, которая в поперечном сечении имеет вид прямоугольника. На входе и выходе рабочей камеры кавитатора, установлены разделительные пластины, предназначенные для поддержания внешней границы возникающей суперкаверны в пространственно устойчивом состоянии.

Основной величиной, определяющей работу кавитационного канала является перепад давления на его внешних границах. Падение гидродинамического давления внутри двумерного канала, стенки которого представляют две параллельные плоскости в первом приближении можно рассчитывать по закону Вейсбаха-Дарси [1, 2]

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{H} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;

$L$  – длина канала, м;

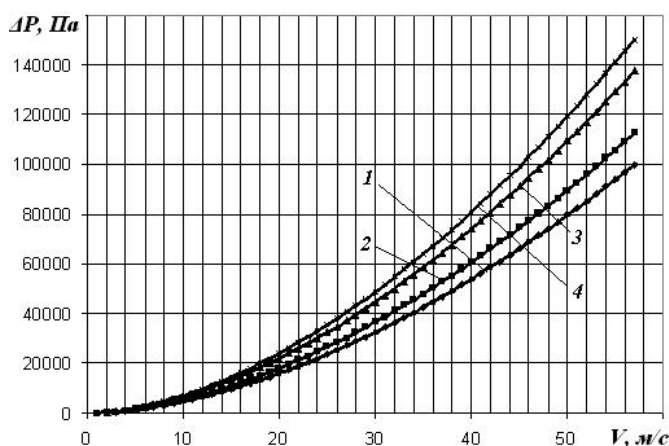
$H$  – высота канала, м;  $\rho$  – плотность потока,  $\text{кг/м}^3$ ;

$V$  – скорость потока, м/с.

При помощи уравнения (1) для нескольких значений плотности потока судовых льяльных вод была получена номограмма зависимости величины падения давления от скорости движения обрабатываемого потока. Она показана на рисунке 1. Полученные данные соответствуют турбулентному режиму движения, а расчет величины коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  осуществлялся по формуле Блазиуса с учетом отсутствия влияния шероховатости стенок канала

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (2)$$

При нахождении числа Рейнольдса  $Re$  в качестве характерного размера использовалась высота канала  $H$ . Кинематическая вязкость потока во всех расчетах принималась неизменной и равной  $\nu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .



*Рис.1. Зависимость перепада давления в кавитаторе  
от входной скорости потока*

$$1 - \rho = 800 \text{ кг/м}^3; \quad 2 - \rho = 900 \text{ кг/м}^3; \quad 3 - \rho = 1100 \text{ кг/м}^3; \quad 4 - \rho = 1200 \text{ кг/м}^3$$

Анализ рисунка 1 позволяет сделать вывод о том, что рост плотности многофазного потока приводит к увеличению величины перепада давления внутри кавитатора. Другими словами, при прочих равных условиях процесс кавитации с ростом плотности будет начинаться при меньших значениях входной скорости обрабатываемого потока.

С эксплуатационной точки зрения особый интерес представляет расчет рабочего процесса внутри рабочей камеры сепаратора. Инженерная методика расчета рабочего процесса внутри кавитатора должна бази-

роваться на уравнении 1 и номограмме 1. Именно величина падения давления по длине рабочей камеры кавитатора, с учетом физических свойств обрабатываемого многофазного потока является определяющей при расчете геометрических размеров рабочей камеры сепарационной установки.

Основные положения расчета рабочего процесса внутри кавитатора в ходе исследований были сформулированы следующим образом:

1. Величина производительности сепаратора может оцениваться по значению массового расхода отбираемого из суперкаверны водяного пара. Масса пара, генерируемого внутри кавитационной полости, рассчитывается по формуле Герца-Кнудсена

$$G = \alpha P_{н.п.} \left( \frac{M}{2\pi R t} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $G$  – масса пара испаряющегося/конденсирующегося за единицу времени на единице поверхности;

$\alpha$  – коэффициент аккомодации (для воды  $\alpha = 0,04-1,0$ );

$P_{н.п.}$  – давление насыщенного водяного пара внутри каверны;

$M$  – молекулярный вес водяного пара;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$t$  – абсолютная температура.

2. Время наполнения каверны водяным паром, при условии, что она имеет форму в виде сферы радиусом  $r$  можно определять как

$$\tau = \frac{r}{3\alpha} \left( \frac{2\pi M}{R t} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

3. Пространственное изменение сферического парового объема можно описывать уравнением вида

$$\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{P_{\infty}}{\rho} \left( \frac{r_{max}^3}{r^3} - 1 \right). \quad (5)$$

4. В случае нарушения устойчивости каверны время схлопывания ее сферического объема может рассчитываться по формуле Релея

$$t = 0,915 r_{max} \sqrt{\frac{\rho}{P_{\infty}}}. \quad (6)$$

5. Условие баланса между давлением внутри каверны и давлением насыщенного водяного пара должно описываться неравенство вида

$$t_p > \frac{r_{max}}{3\alpha} \left( \frac{2\pi M}{R t} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где  $t_p$  – время выхода каверны на стационарное состояние;

$r_{max}$  – максимальный размер каверны при ее расширении.

Из (7) видно, что для температуры многофазного потока равной  $20^{\circ}\text{C}$ , равенство между давлением водяного пара внутри каверны и давлением насыщенного водяного пара будет иметь место при

$$\frac{r_{max}}{t_p} \leq 17,8 \text{ м/с.}$$

6. Оценка массы растворенных газов, возникающих внутри кавитационной каверны прямоугольной формы на первоначальной стадии возникновения каверны внутри сепаратора может осуществляться по выражению

$$G_2 = \frac{4}{3} \frac{c_2}{K} bL^3, \quad (8)$$

где  $G_2$  – масса газа внутри каверны в момент ее выхода на устойчивое состояние;

$c_2$  – начальная концентрация газа в потоке судовых льяльных вод;

$K$  – постоянная Генри;

$b$  – толщина каверны;

$L$  – длина каверны.

При эксплуатации судового сепаратора льяльных вод их исходный состав может быть величиной переменной, что в конечном итоге выразится в изменении его производительности. Для устранения этого недостатка в ходе эксплуатации необходимо постоянно поддерживать неизменной величину массового расхода получаемого в ходе сепарации водяного пара. Для этого была разработана технологическая схема регулирования напорно-расходных характеристик сепаратора, которая показана на рисунке 2. Как видно из рисунка, принцип ее работы основывается на использовании автоматизированной схемы управления.

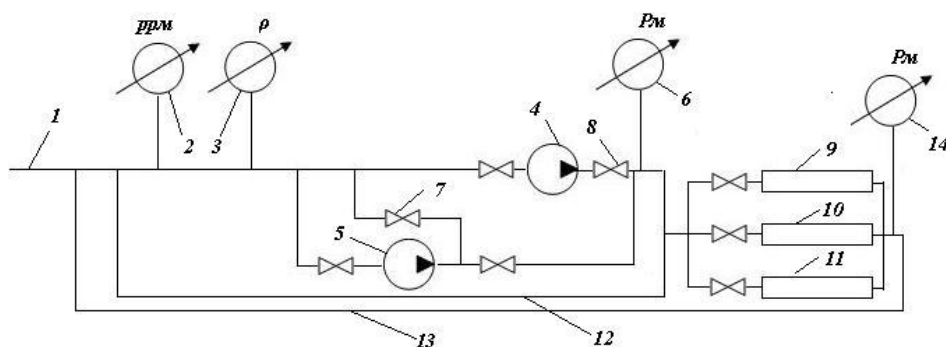


Рис. 2. Схема изменения производительности сепаратора:  
1 – линия подачи судовых льяльных вод; 2 – измеритель концентрации;  
3 – консистометр; 4, 5 – насос; 6, 14 – манометр; 7, 8 – клапан;  
9, 10, 11 – кавитационный канал; 12 – внутренний контур обработки;  
13 – внешний контур обработки

Основными средствами КИПа являются измеритель концентрации 2, консистомер 3 и манометр 6. Функционирование схемы подразумевает использование трех следующих вариантов работы сепаратора.

Первый вариант работы – нормативная эксплуатация, при которой обрабатываемый многофазный поток характеризуется рабочим диапазоном плотности и концентрации нефтесодержащих примесей.

Как видно на схеме, многофазный поток движется по линии 1. В том случае, когда плотность и/или состав судовых льяльных вод не выходят за пределы рабочего диапазона судового сепаратора, при помощи насоса 4 создается необходимое давление на входе в рабочую камеру кавитатора 9.

Характеристика сети, т.е. величина рабочего напора развиваемого насосом 4, находится по уравнению

$$H_{\text{м}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\rho g} + \left( \sum \zeta + \frac{0,3164 l}{\sqrt[4]{Re} d} \right) \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4} + \frac{0,3164 L V^2}{\sqrt[4]{Re} H 2g}, \quad (9)$$

где  $P_{\text{вых}}$  – давление на выходе из кавитационного канала;

$\zeta$  – коэффициент местных потерь;

$Re$  – число Рейнольдса;

$l, d$  – длина и диаметр рабочих трубопроводов;

$Q$  – расход судовых льяльных вод;

$L, H$  – длина и ширина рабочего канала кавитатора;

$V$  – скорость потока на входе в кавитатор.

Численное значение  $P_{\text{вых}}$  в уравнении (9) соответствует показанию манометра 14, который должен устанавливаться сразу на выходе из рабочей камеры кавитатора.

Второе слагаемое в уравнении соответствует потерям напора по длине кавитатора. Третье слагаемое соответствует гидравлическим потерям напора во всей гидравлической сети сепаратора (суммарные потери по длине и во всех местных сопротивлениях).

Второй вариант работы установки – плотность потока судовых льяльных вод и концентрация примесей в них по сравнению с рабочими значениями являются заниженными.

В этом случае необходимо увеличивать производительность сепарационной установки. Как видно на рисунке 2 в технологической схеме предусматривается подключение по схеме параллельного гидравлического соединения дополнительных рабочих кавитационных каналов.

Суммарная характеристика гидравлической сети сепаратора при таком режиме эксплуатации пересчитывается по правилам расчета параллельного соединения:

- общий расход в кавитаторах

$$Q = \sum_l^n Q_i \quad (10)$$

- потери напора на каждой отдельной ветви сети

$$\sum h_l = \dots = \sum h_n = \frac{P_{\text{вых}}}{\rho g} + \left( \Sigma \zeta + \frac{0,3164 l}{\sqrt[4]{Re} d} \right) \frac{16 Q^2}{2 g \pi^2 d^4}. \quad (11)$$

В целом, конечное значение потребного напора всего сепаратора необходимо повышать на величину, соответствующую выражению (11). Другими словами, величина напора, развиваемого насосом 4 (см. рис. 2) должна увеличиваться на численное значение  $\sum_l^n h_n$ . При расчете суммарной характеристики сети значение  $n$  принимается равным числу подключаемых кавитаторов.

Третий вариант работы установки – плотность потока и концентрация примесей в нем превышают предустановленные нормативные значения.

При таком режиме эксплуатации рабочий насос установки 4 уже не будет обеспечивать необходимые расходно-напорные параметры гидравлической сети. В конечном итоге будет наблюдаться срыв характеристики. Такие условия работы сепаратора являются наиболее плохими поскольку резкое изменение величины напора или расхода в сепараторе в конечном итоге приведет к поломке мест соединения рабочих трубопроводов с рабочей камерой сепаратора и его разгерметизации. Единственным техническим решением такой проблемы может быть установка дополнительного нагнетателя. В этом случае в технологической схеме предусматривается установка насоса 5 по схеме последовательного подключения на линии обработки 12. Ввод насоса в эксплуатацию осуществляется за счет клапана 7.

Получаемое давление во всей гидравлической системе сепарационной установки на третьем режиме работы необходимо рассчитывать по правилам последовательного гидравлического соединения:

- суммарный расход в камерах сепарации

$$Q = Q_i ; \quad (12)$$

- потери напора на каждой линии обработки судовых льяльных вод

$$\sum h = \sum_l^n h_i = n \left[ \frac{P_{\text{вых}}}{\rho g} + \left( \Sigma \zeta + \frac{0,3164 l}{\sqrt[4]{Re} d} \right) \frac{16 Q^2}{2 g \pi^2 d^4} \right] \quad (13)$$

Во всех трех случаях работы сепарационной установки предполагалось, что скоростной напор на входе и выходе из сепаратора является идентичным. В том случае, когда это равенство не соблюдается, т.е. когда скорость потока судовых льяльных вод в начале и конце рабочей камеры

различны необходимо учитывать скоростной напор. Для случая, когда обрабатываемый поток характеризуется высокими значениями чисел Рейнольдса (турбулентный режим движения) потребный напор установки определяется как

$$H_n = \frac{v_k^2 - v_n^2}{2g} + \sum h + \frac{p_k}{\rho g}. \quad (14)$$

При движении на относительно не высоких скоростях влияние многофазности потока судовых льяльных вод на пространственные и гидродинамические характеристики суперкавитационной каверны является очень важным. Обычно такая оценка производится с помощью величины скорости распространения звука, которая в обычной чистой воде приблизительно равна 1450 м/с. При наличии воздуха этот показатель резко уменьшается. Для изотермического движения потока с большой скоростью, когда воздух не успевает выделяться удельный объем многофазного потока можно записать в виде

$$V = \frac{1}{\rho_\Sigma} = (1 - M_g)V_{\text{воды}} + M_g V_g, \quad (15)$$

где  $M_g$  – масса воздуха в единице объема судовых льяльных вод;  
 $\rho_\Sigma$  – суммарная плотность многофазного потока;  
 $V_{\text{воды}}$ ,  $V_g$  – удельный объем воды и воздуха в смеси.

С учетом того, что  $V_{\text{воды}} = \text{const}$ , а  $V_g = \frac{k}{p}$  выражение (15) можно

переписать как

$$\frac{1}{\rho_\Sigma} = \frac{(1 - M_g)}{\rho_{\text{воды}}} + \frac{M_g k}{p}, \quad (16)$$

где  $k = RT$ ;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$p$  – давление.

Из (16) величина давления составляет

$$p = \frac{M_g \rho_\Sigma k}{1 - (1 - M_g) \frac{\rho_\Sigma}{\rho_{\text{воды}}}}. \quad (17)$$

С учетом того, что скорость звука в упругой среде, к которой можно относить также и судовые льяльные воды определяется как

$$c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} \quad (18)$$

в соответствии с производной

$$\frac{\partial p}{\partial \rho_{\Sigma}} = M_{\epsilon} k + \frac{2(1-M_{\epsilon})}{\rho_{\text{воды}}} p + \frac{(1-M_{\epsilon})^2}{M_{\epsilon} k} \left( \frac{p}{\rho_{\text{воды}}} \right)^2 \quad (19)$$

окончательное значение распространения скорости звука в судовых льяльных водах при сепарации можно записать в виде

$$c = \sqrt{M_{\epsilon} k} + \frac{(1-M_{\epsilon})p}{\rho_{\text{воды}} \sqrt{M_{\epsilon} k}}. \quad (20)$$

При численных значениях:

масса воздуха в единице объема судовых льяльных вод –  $M_{\epsilon}=10^{-4}$ ;

абсолютная температура –  $T=293 \text{ K}$ ;

давление –  $p=405468 \text{ Па}$ ;

удельная газовая постоянная для сухого воздуха –  $R=287 \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}}$ , выраже-

ние (20) дает оценку распространения скорости звука в судовых льяльных водах равную  $c=139 \text{ м/с}$ . Полученное значение в десять раз меньше аналогичного параметра для однофазного потока чистой воды. Число Маха при скорости сепарируемого потока судовых льяльных вод  $30 \text{ м/с}$  становится равным  $M=V/c=0,21$ , что в свою очередь указывает на необходимость учета эффектов сжимаемости.

### Выводы:

1. Основной величиной, определяющей работу кавитационного канала является перепад давления на его внешних границах. В общем случае он должен определяться с учетом скоростного напора.

2. При прочих равных условиях с ростом плотности обрабатываемого потока судовых льяльных вод процесс кавитации будет начинаться при меньших значениях входной скорости.

3. При эксплуатации судового сепаратора льяльных вод их исходный состав может быть величиной переменной, что в конечном итоге выразится в изменении его производительности. Для устранения этого недостатка разработана технологическая схема, позволяющая в ходе эксплуатации постоянно поддерживать неизменной величину массового расхода получаемого в ходе сепарации водяного пара.



### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Международная конвенция MARPOL 73/78.*
2. *Малахов А.В., Ткаченко И.В. Гидродинамика разделения многофазных смесей на основе воды // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: ХАИ, 2008. – № 4 (51) – С. 34-38.*
3. *Малахов А.В., Ткаченко И.В., Гугуев О.Е. Экспериментальное изучение гидродинамического процесса суперкавитации при сепарации судовых льяльных вод // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – 2009. – Вип. 27. – С. 110-116.*
4. *Савченко Ю.Н. Исследования суперкавитационных течений // Прикладна гідромеханіка. –2007. – Т. 9(81). – № 2-3.*
5. *Сиротюк М.Г. Влияние температуры и газосодержания жидкости на кавитационные процессы // Акустический журнал. – 1966. – Т.12. – Вип.1. – С. 87-92.*

*Стаття надійшла до редакції 21 вересня 2012 р.*