



СПЕЦИФИКА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА ПРИ ЕГО СЕПАРАЦИИ

*Малахов А.В., Леонов В.В., Старостин С.Н.
Одесский национальный морской университет,
Маслов В.А.*

Херсонская государственная морская академия

В статье рассмотрена технология сепарации судовых льяльных вод при помощи процесса суперкавитации. Рассмотрены основные вопросы управления границами кавитационной каверны. Дано описание разработанного графического метода расчета искусственной кавитации.

Ключевые слова: судовые льяльные воды, сепарация, кавитационная суперкаверна, границы кавитации, рабочая камера сепаратора.

Введение. В условиях эксплуатации водного транспорта в настоящее время выработалась четкая тенденция к повышению мощностей судовых энергетических установок (СЭУ) с одновременным снижением энергетических ресурсов, затрачиваемых на работу судна. Используются различные схемы регенерации тепла, применяются новые конструкции судовых дизелей и задействуются нетрадиционные источники энергетических ресурсов к одному из которых можно отнести судовые льяльные воды – смесь воды с концентрированными продуктами нефтехимии. При работе судов они являются наиболее многотоннажным видом отходов и согласно регламентирующим требованиям, все суда должны оборудоваться сепараторами судовых льяльных вод. Выходная концентрация примесей в очищенной воде должна составлять менее 15 мг/л. В ряде особых районов планеты сброс судовых льяльных вод за борт вообще запрещен.

Проблема сепарации судовых льяльных вод очень актуальна и с экологической точки зрения, а их переработка строго регламентируется основным нормативным документом – требованиями MARPOL 73/78. Если рассматривать экономический аспект проблемы сепарации судовых льяльных вод то можно констатировать, что при использовании получаемых в ходе их переработки продуктов нефтехимии может достигаться экономия сопоставимая с заработной платой экипажа судна.

Цель статьи. Целью статьи является описание новых результатов по использованию технологии обработки судовых льяльных вод. Получаемые на выходе нефтепродукты могут рассматриваться как дополнительный энергетический источник для СЭУ. Переработка судовых льяльных вод напрямую приведет к повышению не только экономических показателей работы судна, но и повлияет на качество его эксплуатации. В этом случае возможно повышение суммарного КПД СЭУ и сведение к допустимым нормам экологического загрязнения водного бассейна в районе плавания судна.

Постановка проблемы. В ходе проводимых исследований было установлено, что процесс сепарирования судовых льяльных связан с одновременным решением двух научных проблем. К первой проблеме относится уменьшение количества вредных стоков, возникающих при работе судов водного транспорта. Ко второй проблеме относится разработка новой технологии для рентабельного получения вторичных энергетических ресурсов в условиях работы судна.

Основной и принципиальный недостаток всех существующих технологий сепарации судовых льяльных вод заключается в невозможности сбора и последующей переработки получаемой высококонцентрированной смеси нефтепродуктов. Конечным продуктом всегда является только очищенная вода. Решение этой проблемы в аспекте отдельного получения воды и нефтепродуктов может кардинальным образом повлиять на сокращение объемов используемых природных ресурсов и повысить качество контроля за состоянием экологии и биосферы в планетарном масштабе.



На актуальность и необходимость решения рассматриваемой проблемы сепарации СЛВ также указывает ряд международных соглашений, национальных программ и нормативных правительственных документов. К основному перечню таких документов относятся: Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях, MARPOL 73/78, Закон України «Про Основні засади державної екологічної політики України на період до 2020 року».

Постановка задачи. Метод кавитационной сепарации СЛВ разработан недавно и он основывается на использовании принципа холодного кипения потока за счет низкой величины его давления в локально выделенной области пространства рабочей камеры сепарационной установки. Схематическое изображение рабочего процесса показано на рисунке 1, а сам метод должен использоваться для чисел кавитации не превышающих величину $Q=0,3$.

Принцип работы кавитационного сепаратора судовых льяльных вод базируется на фазовом переходе водной составляющей под воздействием на обрабатываемый многофазный поток кавитационного поля в пределах значений температуры от 20 до 70 °С. Процесс такого фазового перехода является регулируемым, а сама кавитация может создаваться двумя способами – гидромеханическим и ультразвуковым. Гидромеханическая кавитация в свою очередь может возникать при реализации двух физических процессов:

– за счет повышения скорости движения потока судовых льяльных вод с соответствующим падением давления. Такой процесс характеризуется малыми значениями чисел кавитации ($Q < 0,2$);

– путем искусственного вдува потока газа, чаще всего воздуха в движущийся поток. Такой процесс характеризуется повышенными значениями чисел кавитации ($0,18 < Q < 0,34$).

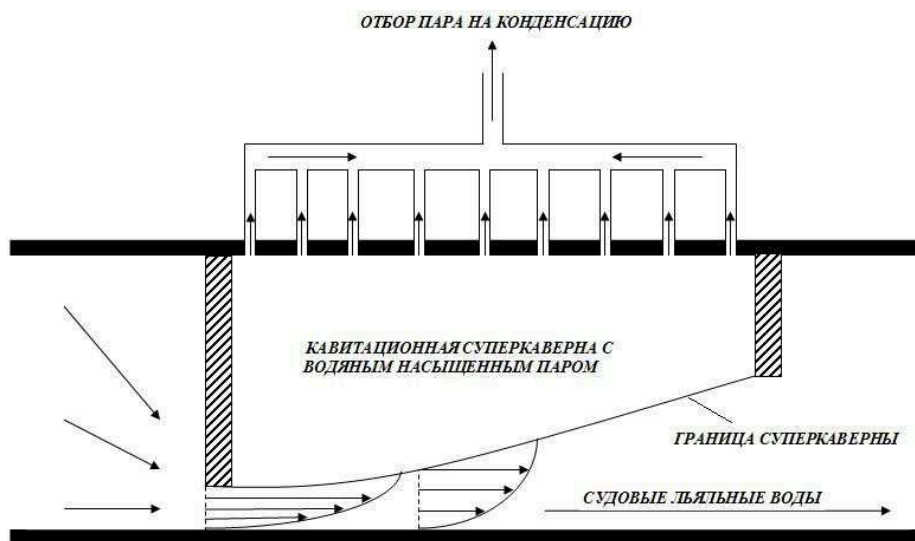


Рисунок 1 – Схема кавитационной очистки судовых льяльных вод

Все существующие технологии сепарации судовых льяльных вод предназначены для очистки воды от примесей и не позволяют выполнять сбор концентрированных остатков нефтепродуктов на выходе из сепаратора. Единственной альтернативой может выступать разработанный метод кавитационной сепарации, позволяющий получать очищенную воду с концентрацией примесей менее 15 мг/л.

В силу новизны метода многие аспекты его практической реализации остаются до сих пор не исследованными. В основном все нерешенные вопросы связаны с созданием и поддержанием на устойчивом уровне границ суперкавитационной каверны при наименьших затратах энергии, как на создание ультразвукового поля, так и на



поддержание высоких значений скорости движения обрабатываемого потока. Дополнительную сложность добавляет отбор сепарируемого водяного насыщенного пара из каверны в силу чего ее динамическое поведение всегда характеризуется нестационарным характером и пространственным колебанием ее внешних границ.

В качестве наиболее рационального решения при проведении предварительных исследований был рассмотрен комбинированный способ создания и последующего управления границами суперкавитационной каверны. На первоначальной стадии использование ультразвукового источника волн пониженного давления приведет к получению первой стадии кавитации, а дальнейшая вентиляция (принудительный вдув воздуха) каверны позволит вывести ее на режим суперкавитации.

Анализ получаемой внутри рабочей камеры сепаратора зоны устойчивой суперкавитационной каверны может осуществляться при помощи экспериментальных данных работы [6]. Входная разделительная пластина рабочей камеры сепаратора (рис. 1) может рассматриваться, как поворотный затвор в вертикальном положении. Пример такого затвора показан на рисунке 2, а графическое отображение границ зоны устойчивой кавитации за клапанами дискового, шарового и пробкового типа в зависимости от степени их открытия показано на рисунке 3.

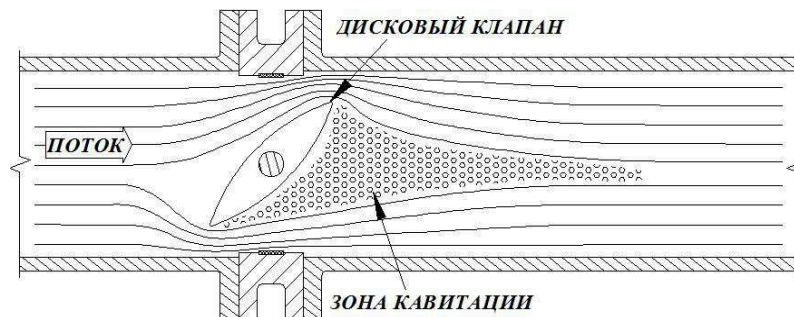


Рисунок 2 – Поворотный затвор [6]

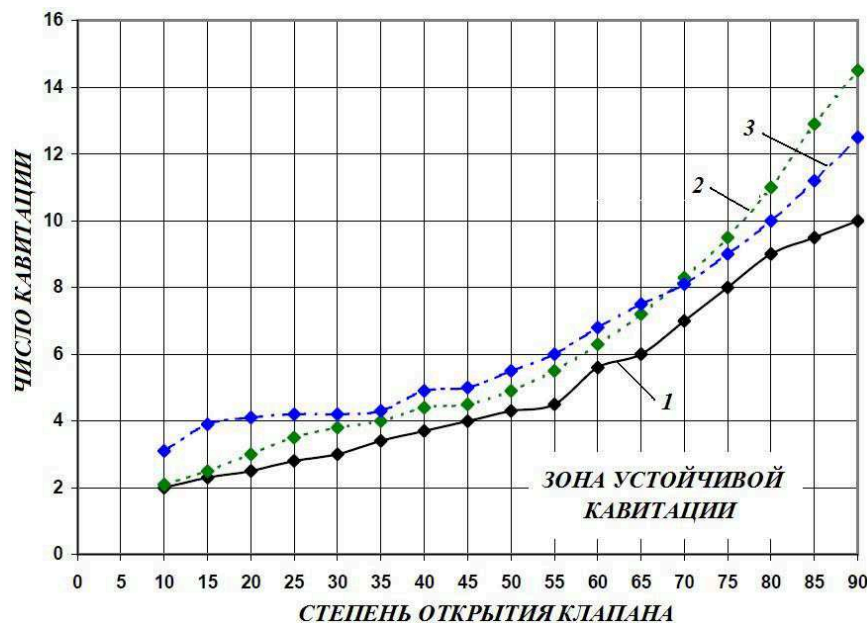


Рисунок 3 – Характеристики зоны устойчивой кавитации за клапанами [6]:
1 – пробковый кран; 2 – дисковый клапан; 3 – шаровый клапан

Анализ графика показывает, что вне зависимости от конструкции клапана и его геометрического положения по отношению к стенкам трубопровода верхняя граница зоны устойчивой кавитации соответствует числу кавитации равному $\Omega=2$. Эта величина при проведении дальнейших исследований должна ограничивать скоростной диапазон движения потока судовых льяльных вод на входе в рабочую камеру кавитатора.



Основные результаты исследований. В ходе исследований особое внимание было уделено вопросу о динамике поведения и месте ввода воздуха, подаваемого на искусственную вентиляцию каверны. В случае, когда скорость воздуха превысит величину, рассчитываемую по выражению (1) вдуваемый воздух сможет преодолеть величину давления движущегося потока судовых льяльных вод и разрушать границу суперкаверны.

$$V_B > V_{\text{СЛВ}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{СЛВ}}}{\rho_B} (1 + \Omega)}, \quad (1)$$

где Ω – число кавитации; $\rho_{\text{СЛВ}}$ и $V_{\text{СЛВ}}$ – плотность и скорость потока судовых льяльных вод; ρ_B и V_B , –плотность и скорость вдуваемого воздуха.

На основании анализа результатов работ работ [1-5] был сделан вывод, что оптимальным местом ввода воздуха на создание и последующую вентиляцию каверны должна быть не вершина входной разделительной пластины, а ее основание. Известно, что в угловых зонах как вверх, так и вниз по потоку всегда образуются застойные вихревые зоны. При принудительном вдуве воздуха каверна будет устойчиво расти и поддерживаться в своих пространственных размерах без срыва потока с верхней кромки пластины.

Срыв потока судовых льяльных вод с разрушением кавитационной каверны также будет неизменно приводить к пульсирующему характеру процесса сепарации. Устранение таких пульсаций возможно достичь путем уменьшения скорости движения судовых льяльных вод либо за счет вентиляции каверны. В этом случае число кавитации может быть смещено в область более высоких значений. Преимущество искусственной вентиляции каверны при обработке судовых льяльных вод наглядно демонстрируется полученным экспериментальным путем графиком, представленном на рисунке 4. На нем видно, что при переходе на меньшие скорости (с ростом числа кавитации) входа потока в сепаратор величина давления парообразования повышается. Приведенные экспериментальные результаты были получены для потока воды, движущегося в цилиндрическом трубопроводе при температуре нагрева 60°C .

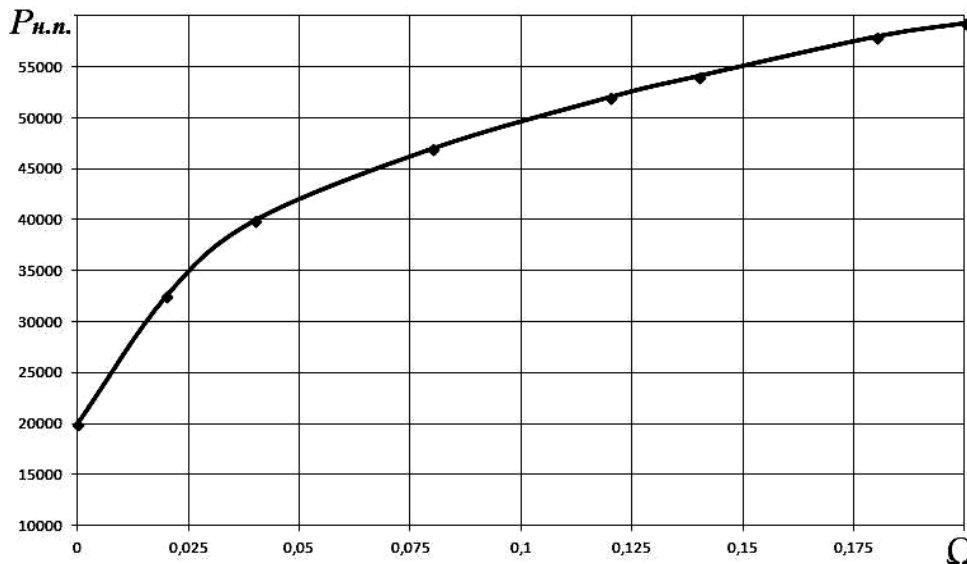


Рисунок 4 – Зависимость давления кипения от числа кавитации

В ходе проведения исследований для искусственной вентиляции кавитационной каверны был разработан графический метод расчета. Вычисления производились для кавитационных режимов, при которых геометрическая конфигурация суперкаверны между двумя разделительными пластинами рабочего канала судового сепаратора льяльных вод представляет собой трапецию. Ее стороны соответствовали высотам



разделительных пластин и расстоянию между ними. Общая расчетная схема такой каверны соответствует рис. 1.

Согласно данным работы [1] величина коэффициента сопротивления насадка в диапазоне малых чисел кавитации, соответствующих развитой каверне не зависит от его формы. По этой причине была принята гипотеза, что коэффициент сопротивления входной разделительной пластины при возникновении за ней суперкавитации подчиняется зависимости, аналогичной диску или шару. Подтверждение этой гипотезы частично присутствует в полученных экспериментальных данных, когда для чисел кавитации $\Omega > 0,1$ коэффициент сопротивления одиночной пластины попадал в зону автомодельности и был равен $C_x = 0,918$. В этом случае можно принимать, что динамический напор входящего в рабочую камеру потока судовых льяльных вод передается входной пластине в виде сопротивления

$$F_x = C_x \frac{\rho V^2}{2} S_{ex} \quad (2)$$

где S_{ex} – площадь входной пластины.

При таком динамическом взаимодействии можно считать, что вся кинетическая энергия движущегося потока переходит в потенциальную энергию. Такой переход происходит в сечении, расположенном сразу за входной пластиной рабочей камеры кавитационного канала. Это сечение должно всегда соответствовать максимальному миделевому сечению зоны суперкавитации. В этом случае можно записать равенство

$$F_x = f_1 (P_{ex} - P_{н.п.}) S_{ex} \quad (3)$$

Из (3) следует, что

$$C_x = f_1 \Omega \quad (4)$$

Коэффициент f_1 можно принимать равным значениям из диапазона от 0,7 до 0,8. Его более высокие значения должны соответствовать малым числам кавитации (от 0,1 до 0,3) и наоборот.

Коэффициент расхода воздуха, подаваемого на вентиляцию каверны оценивался в зависимости от способа создания каверны. В случае, если каверна создается только путем вдува воздуха он может рассчитываться по аналогии с кавитационным обтеканием пластины по эмпирической формуле из работы [1].

$$Q' = \frac{4,47 \sqrt{2 - \frac{\Omega Fr_d^2}{H}}}{Fr_d^2 (Fr_d - 1,35) \Omega^{1,75} (\Omega^3 Fr_d^4 - 1,955)^{1,25}}, \quad (5)$$

где Fr_d – число Фруда, рассчитываемое по выходному диаметру d (от 1 до 2 мм) воздушных сопловых направляющих аппаратов ($Fr_d = \frac{V^2}{gd}$); H – относительная (нормированная на высоту рабочей камеры) высота пластины.

Зависимость числа Фруда Fr_d от числа кавитации Ω для набора значений скорости потока на входе в рабочую камеру кавитатора от 2 до 15 м/с показана на рисунке 5.

На рисунке 6 показана зависимость между коэффициентом расхода воздуха, подаваемого на вентиляцию каверны и числом кавитации обрабатываемого потока судовых льяльных вод. Полученный результат полностью соответствует экспериментальным наблюдениям – рост скорости потока выражающийся в падении числа кавитации приводил к увеличению количества воздуха, которое необходимо подавать на вентиляцию каверны. Рабочие значения чисел кавитации от 0,01 до 0,025



соответствуют количеству подаваемого воздуха в диапазоне от 13 до 0,1 % от объема возникающей кавитационной каверны.

При разработке метода графического определения параметров кавитирующего потока при искусственной вентиляции каверны принималось, что каверна имеет форму прямоугольной трапеции, объем которой определяется как

$$W = \Delta \left(\frac{H + h}{2} \right) L. \quad (6)$$

Число Фруда, определенное по объему кавитационной суперкаверны W и скорости обрабатываемого потока судовых льяльных вод рассчитывалось по формуле

$$Fr_w = \frac{V}{\sqrt{g^3 W}} \quad (7)$$

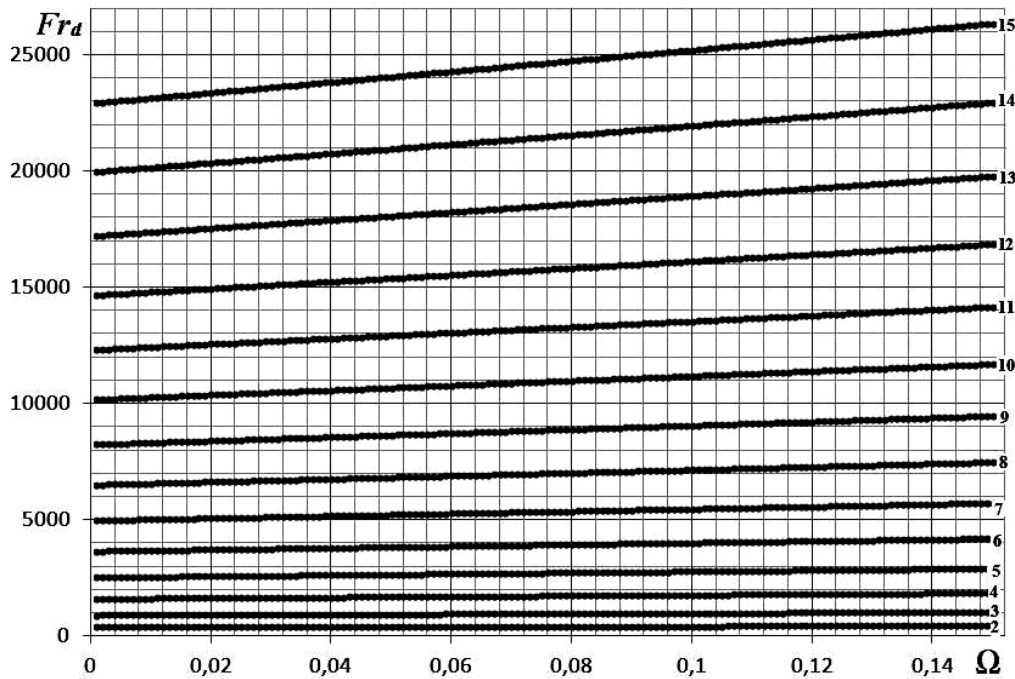


Рисунок 4 – Зависимость числа Фруда Fr_d от числа кавитации Ω при $V_{ex} = 2 - 15$ м/с

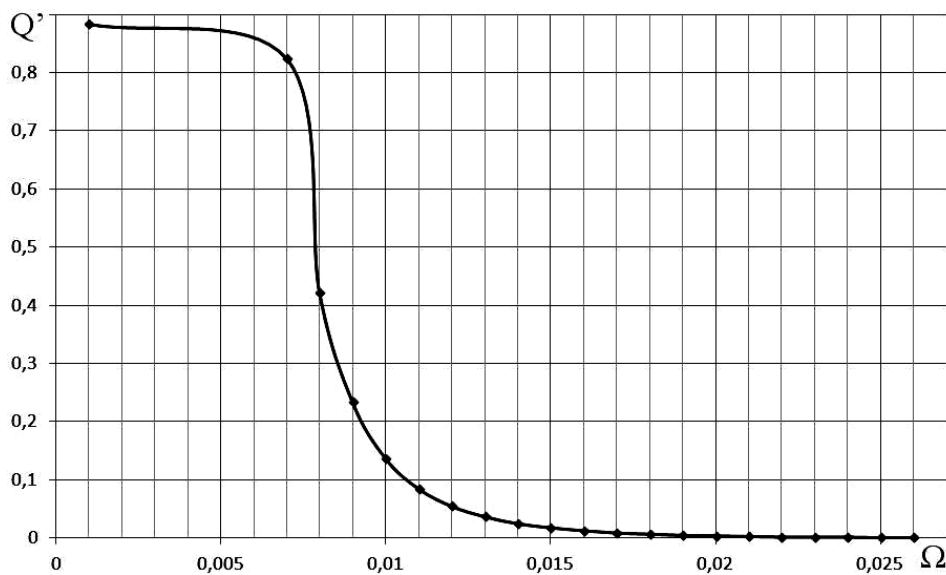


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента расхода воздуха Q' от числа кавитации Ω



Связь между числом Фруда, рассчитанным по объему каверны и по размеру входной пластины Fr_H , находилась по выражению

$$Fr_H = 1,09 \left(\sqrt[6]{\frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2}} \right) Fr_W . \quad (8)$$

На рисунке 6 показана зависимость между числами Фруда, рассчитанными соответственно по объему кавитационной каверны и по относительному размеру входной разделительной пластины H . Расчет был выполнен для $H=0,75$, т.е. для степени перекрытия потока на входе равной 75 %. Все результаты, полученные при построении графиков соответствуют диапазону изменения чисел кавитации обрабатываемого потока от $\Omega=0,001$ до $\Omega=0,15$. Каждая серия расчетных значений соответствует определенной величине скорости потока на входе в рабочую камеру кавитационного канала, значения которой лежат в диапазоне от 2 до 15 м/с.

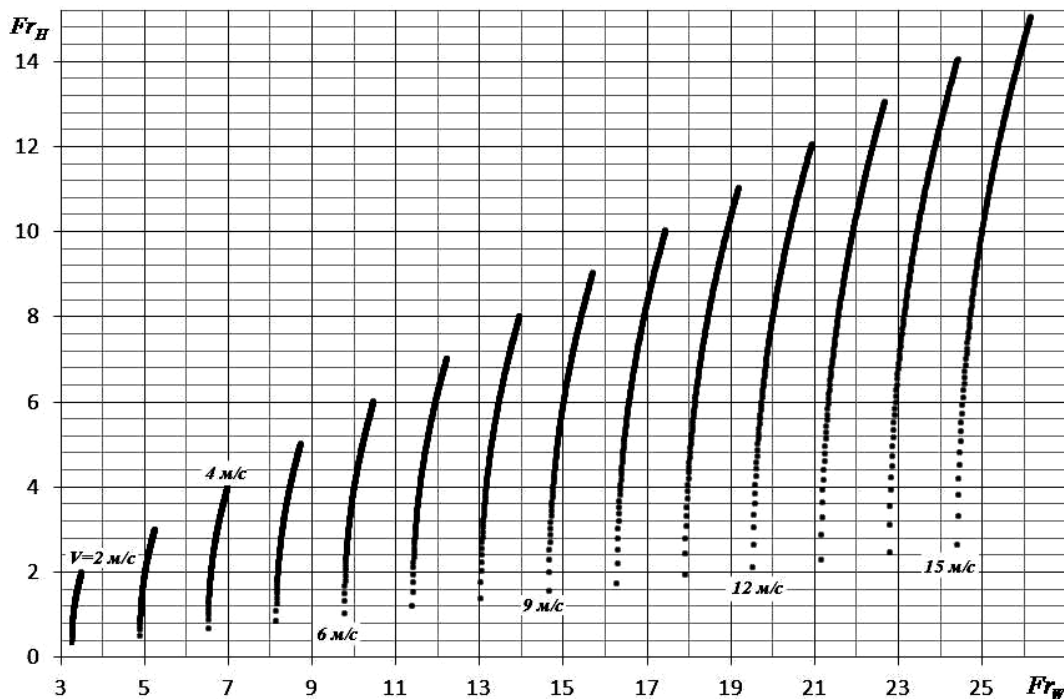


Рисунок 6 – Зависимость Fr_W от Fr_H при $V_{ax} = 2 - 15$ м/с

Использование в практических целях разработанного метода графического расчета основывается на том, расчет рабочих характеристик процесса суперкавитационной сепарации должен сводиться к определению кавитационных и гидродинамических характеристик основного элемента рабочей камеры - входной разделительной пластины.

Алгоритм расчета процесса сепарации на основе приведенных графических зависимостей включает в себя выполнение следующих операций:

1. Задаются степень перекрытия потока на входе в сепаратор путем набора значений высоты входной разделительной пластины.

На этом этапе степень перекрытия потока должна изменяться от 60 до 70 % с шагом изменения высоты пластины от 0,5 до 1 %.

2. Задаются скорость обрабатываемого потока судовых льяльных вод и размеры рабочей камеры сепарационной установки. После этого для всего набора данных с использованием приведенных выше выражений находятся числа Фруда Fr_H, Fr_W .

3. С использованием метода последовательных приближений для всего ряда геометрических размеров определяются характеристики пластины:

- задается ряд значений коэффициента расхода воздуха Q' ;



– по диаграмме (рис. 5) находятся соответствующие числа кавитации;

4. С учетом ранее полученного набора значений площади входной разделительной пластины по выражению

$$Q = Q'VS \quad (9)$$

определяется расход воздуха, подаваемого на вентиляцию каверны.

5. После анализа размеров подводящих трубопроводов и воздухопроводов системы сепарации, а также рабочих характеристик нагнетательного оборудования, используемого в контуре обработки судовых льяльных вод выбираются:

- рабочее значение коэффициента расхода воздуха Q' ,
- число кавитации, которое необходимо поддерживать в ходе процесса сепарации судовых льяльных вод;
- высота входной разделительной пластины.

6. Для выбранных значений производится оценка размеров кавитационной суперкаверны внутри рабочей камеры сепарационной установки по выражениям [1]

$$\frac{H_{\max}}{H} = \sqrt{\frac{C_x(1 + \Omega)}{k\Omega}} \quad (10)$$

$$\frac{L}{H} = \frac{1,667}{\Omega} \quad (11)$$

7. При сопоставлении полученных размеров кавитационной суперкаверны с рабочей областью между входной и выходной разделительными пластинами рабочей камеры сепаратора в первом приближении будет получено расхождение. В большинстве случаев размеры рабочей области камеры будут меньше размеров суперкаверны, что указывает на неполноту использования процесса суперкавитации при испарении водной фазы из обрабатываемого потока судовых льяльных вод.

8. Выполняются уточняющие расчеты во втором приближении. Целью таких расчетов является корректировка размеров кавитационной суперкаверны с учетом обеспечения минимального отклонения размеров внешней границы каверны (ее выпуклости) от линии, соединяющей входную и выходную разделительные пластины.

Выводы:

1. Все существующие технологии сепарации судовых льяльных вод предназначены для очистки воды от примесей и не позволяют выполнять сбор концентрированных остатков нефтепродуктов на выходе из сепаратора. Единственной альтернативой может выступать разработанный метод кавитационной сепарации, позволяющий получать очищенную воду с концентрацией примесей менее 15 мг/л.

2. Для большинства гидравлических конструкций верхняя граница зоны устойчивой кавитации соответствует числу кавитации равному $\Omega=2$ и эта величина при проведении исследований должна ограничивать скоростной диапазон движения потока судовых льяльных вод на входе в рабочую камеру кавитатора.

3. Искусственная вентиляция кавитирующего потока и режим ультразвуковой кавитации должны всегда использоваться в комбинации с регулированием скоростных характеристик обрабатываемого потока судовых льяльных вод.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Искусственная кавитация / [И. Т. Егоров, Ю. М. Садовников, И. И. Исаев, М. А. Басин]. – Ленинград : Судостроение, 1971. – 280 с.

2. Гогиш Л. В. Отрывные и кавитационные течения: основные свойства и расчетные модели / Л. В. Гогиш, Г. Ю. Степанов. – М. : Наука ; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 384 с.



3. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974.– 687 с.
4. Chen Y. Two-Phase Modeling of Cavitated Flows / Y. Chen, S. D. Heister // Computers and Fluids. – 1995. – Vol. 24, No. 7. – P. 799-809.
5. Yu S. T. Treatments of Stiff Source Terms in Conservation Laws by the Method of Space-Time Conservation Element and Solution Element / S. T. Yu, S. C. Chang // AIAA 97-0435. – 1997.
6. Rahmeyer William J. Test Procedures for Determining Cavitation Limits in Control Valves / Rahmeyer William J. // Journal AWWA. – November 1986. – P. 55-58.

Малахов О.В., Леонов В.В., Старостін С.М., Маслов В.А. СПЕЦИФІКА УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ БАГАТОФАЗНОГО ПОТОКУ ПРИ СЕПАРАЦІЇ

У статті розглянута технологія сепарації суднових льяльних вод за допомогою процесу суперкавітації. Розглянуті основні питання щодо управління межами кавітаційної каверни. Дано опис розробленого графічного методу розрахунку штучної кавітації.

Ключові слова: суднові льяльні води, сепарація, кавітаційна суперкаверна, межі кавітації, робоча камера сепаратора.

Malahov A.V., Leonov V.V., Starostin S.N., Maslov V.A. SPECIFICATION OF MULTYPHASE FLOW PARAMETERS CONTROL DURING THE SEPARATION

In the article a bilge separation technology is described with the help of supercavity process usage. There were considered main questions for cavity boundaries control. A description of newly developed graphical method for artificial cavity calculation was given.

Keywords: ship bilge, separation, cavitating supercavern, cavity boundaries, separator working chamber.