

СЕПАРАЦИЯ СУДОВЫХ ЛЬЯЛЬНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССА СУПЕРКАВИТАЦИИ

Леонов В.В., Осташко Е.А.,

Одесский национальный морской университет,

Ткаченко И.В.,

Одесская национальная морская академия,

Старостин С.Н.,

Одесский национальный морской университет

В работе рассмотрены основные принципы кавитационного метода сепарации СЛВ. Рассмотрены основные теоретические аспекты кавитации при обработке СЛВ. Приведено описание схемы повышения производительности сепаратора.

Ключевые слова: кавитация, суперкаверна, сепарационная установка льяльных вод.

Введение. Актуальность решения проблемы сепарации судовых льяльных вод (СЛВ) в условиях работы судна напрямую приводит к повышению не только его экономических показателей работы, но и влияет на качество его эксплуатации. В этом случае возможно повышение суммарного КПД судовой энергетической установки и сведение к допустимым нормам экологического загрязнения водного бассейна в районе плавания.

Переработка СЛВ напрямую связана с получением вторичных энергоресурсов в условиях работы судна и практически никогда ранее не рассматривалась.

Основная цель проведенных исследований заключалась в получении новых данных, указывающих на возможность создания принципиально новой технологии сепарации СЛВ. Такая технология должна базироваться на гидродинамической кавитации многофазного потока с искусственным управлением размерами суперкаверны при помощи искусственной вентиляции.

Основная задача исследований была сведена к получению результатов, позволяющих выполнить оценку производительности такой технологии и разработать новую конструкцию судового сепаратора.

Результаты исследований. Основные принципы функционирования технологических схем сепарации СЛВ напрямую определяются рабочими процессами, применяемыми для разделения их составных компонент. В ходе исследований была разработана общая классификация существующих методов сепарации. Она показана на рисунке 1, где видно, что все судовые схемы обработки СЛВ базируются на двенадцати отличающихся между собой технологиях.

Выполненный анализ приведенных методов показал, что все они характеризуются одним общим недостатком – в ходе сепарации СЛВ выходным продуктом является вода. При их использовании качественное получение и сбор вторичных продуктов нефтехимии, получаемых в ходе разделения СЛВ, невозможен. По этой причине в ходе исследований был

сделан вывод о необходимости разработки нового метода сепарации и целесообразности использования в этом случае гидродинамического процесса суперкавитации.

При локальном зарождении в потоке СЛВ суперкавитирующей каверны внутри нее будет всегда находиться насыщенный водяной пар, непрерывный отбор которого будет способствовать получению высококонцентрированной смеси нефтепродуктов, составлявших первоначальную основу СЛВ. Пример суперкавитационной каверны, взятый из работы [1] показан на рисунке 2.

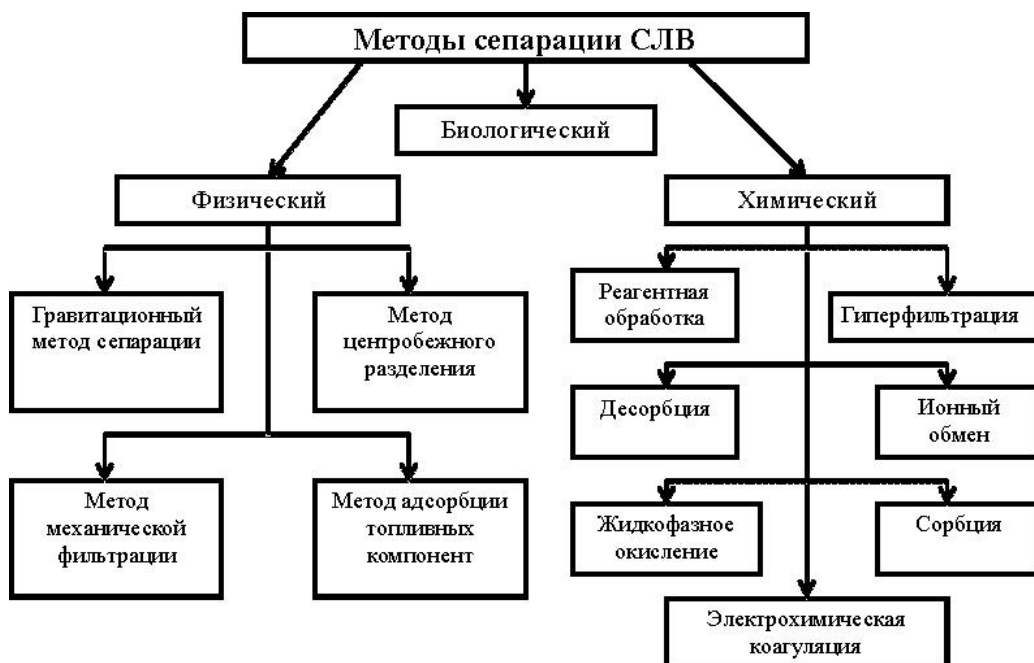


Рисунок 1 – Методы сепарации судовых льяльных вод

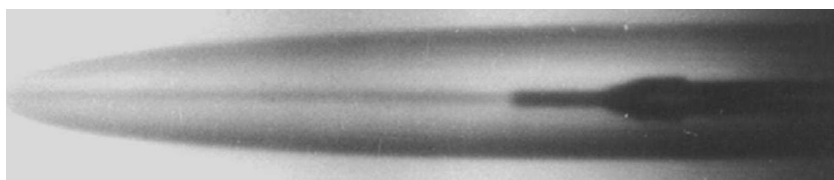


Рисунок 2 – Стационарная суперкавитационная каверна

Большинство известных конструкций гидродинамических сепараторов СЛВ используют плоские каналы, внутри которых происходит либо флотация, либо плотностная стратификация обрабатываемого потока. Способы движения потока в таких каналах зависят от конструкции сепаратора и бывают принудительными либо базируются на действии массовых сил.

Величину падения давления внутри двумерного канала, стенки которого представляют две параллельные плоскости в первом приближении, можно оценивать по закону Вейсбаха-Дарси [2,3].

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

где λ – коэффициент гидравлического трения; L – длина канала, м; H – высота канала, м; ρ – плотность потока, кг/м^3 ; V – скорость потока, м/с.

На основании (1) для различных значений плотности потока судовых льяльных вод была составлена номограмма зависимости величины падения давления от скорости движения обрабатываемого потока СЛВ. Она показана на рисунке 3. Расчет производился для турбулентного режима течения, при котором оценка величины λ осуществлялась по формуле Блазиуса

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

а характерным размером при расчете числа Рейнольдса Re являлась высота канала H . Значения кинематической вязкости потока брались идентичными и равными $\nu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$.

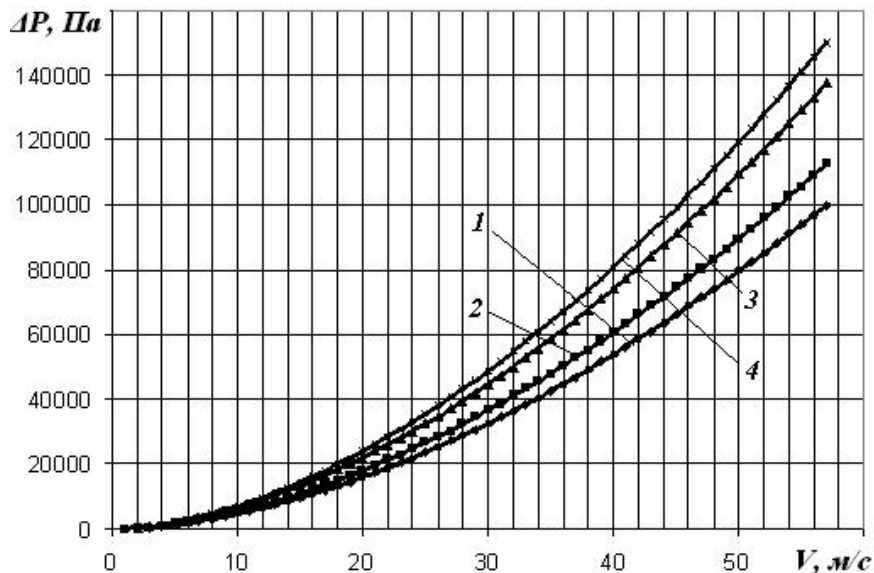


Рисунок 3 – Влияние скорости на падение давления в потоке 1 – $\rho=800 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho=900 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho=1100 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho=1200 \text{ кг/м}^3$

Как видно на рис. 2, рост плотности потока СЛВ приводит к увеличению величины падения давления в нем, т.е. при прочих равных условиях в этом случае наступление процесса кавитации следует ожидать при меньших скоростях движения. При этом величина скорости напрямую определяется величиной избыточного давления: чем выше избыточное давление в прокачиваемой смеси СЛВ, тем выше будет воздействие кавитации на эффективность технологических процессов сепарирования.

В соответствии с данными работы [4] повышение давления будет приводить при кавитации к сдвигу температуры обрабатываемой среды. В частности, для чистой воды максимум кавитационного воздействия при 4 атм избыточного давления наблюдался при температурах 85 - 95 °С.

Специфической особенностью суперкавитации в многофазных потоках является, согласно результатам работы [5], отсутствие влияния физических свойств на динамику существования кавитационной каверны. В частности,

такие два важных фактора, как коэффициент поверхностного натяжения и вязкость среды при неизменности числа кавитации потока не изменяют размеры кавитационной полости. Так, например, влияние вязкости начинает сказываться при ее величине, превышающей на два порядка (в 100 и более раз) аналогичную величину для чистой воды.

Поскольку при сепарации СЛВ основным вопросом является количество отбираемого водяного пара, то особый интерес представляет оценка его массы. Для кавитационной суперкаверны эта величина в любой момент времени, включая и время, соответствующее первоначальной стадии развития каверны, в первом приближении может быть найдена 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 или конденсирующегося за единицу времени на единице поверхности; α – коэффициент аккомодации (для воды $\alpha = 0,04 \dots 1,0$); $P_{н.п.}$ – давление насыщенного водяного пара внутри каверны; M – молекулярный вес водяного пара; R – универсальная газовая постоянная; t – абсолютная температура.

Для приближенной оценки времени τ , за которое кавитационная суперкаверна будет полностью заполнена водяным насыщенным паром, можно считать, что она имеет сферическую форму с радиусом r и тогда

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

Особое внимание необходимо уделять устойчивости кавитационной каверны при действии на нее сил давления. В том случае, когда определяющей является величина гидростатического давления, уравнение, описывающее геометрию поведения сферического парового объема, имеет вид:

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

Время схлопывания такого пузырька может рассчитываться по эмпирической формуле Релея

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

При расширении каверны давление пара внутри нее не всегда будет соответствовать давлению насыщенного пара. Для удовлетворения их равенства необходимо, чтобы выполнялось неравенство вида

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

где t_p – время выхода каверны на стационарное состояние; r_{\max} – максимальный размер каверны при ее расширении;

Оценка выражения (7) показывает, что при температуре СЛВ равной 20°C , давление водяного пара внутри каверны будет равным давлению насыщенных паров при соблюдении неравенства вида $\frac{r_{\max}}{t_p} \leq 17,8 \text{ м/с}$.

Поскольку в СЛВ всегда присутствуют растворенный газ, то на первоначальной стадии возникновения каверны внутри сепаратора также необходимо учитывать его массу. Считая, что каверна имеет вид плоского прямоугольника, этот параметр можно определять по выражению

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

где G_g – масса газа внутри каверны в момент ее выхода на устойчивое состояние; c_g – начальная концентрация газа в потоке СЛВ; K – постоянная Генри; b – толщина каверны; L – длина каверны.

При сепарации СЛВ предложенным методом кавитационного испарения водной составляющей, важным вопросом является устойчивость каверны при отборе из нее водяного пара. Вследствие изменения объема кавитационной полости ее внешний контур будет постоянно пространственно колебаться относительно своего устойчивого стационарного положения. На эти колебания будет влиять соотношение между величинами давления внутри каверны и в движущемся потоке СЛВ. В этом случае всегда необходимо делать оценку устойчивого равновесия, при котором каверна сможет вернуться к своему максимальному размеру или наоборот придет в состояние полости, не участвующей в кавитационном процессе. Величина критического радиуса кавитационной каверны по отношению к давлению в основном потоке СЛВ может определяться как

$$r_{кр} = \frac{4}{3} \frac{\sigma}{(P_n - P_{кав})}, \quad (9)$$

где: σ – коэффициент поверхностного натяжения; P_n – давление внутри каверны; $P_{кав}$ – пороговое давление, соответствующее возникновению кавитации (в первом приближении принимается равным давлению насыщенного пара при данной температуре).

Ниже величины, рассчитываемой по (9), процесс отбора водяного пара при сепарации СЛВ производить нет смысла, поскольку каверна уже не сможет восстановиться до исходного размера.

К числу основных факторов, влияющих на процесс параобразования при заполнении паром кавитационной каверны, относятся температура и

статическое давление. При сепарации СЛВ определяющим показателем производительности будет являться массовый расход получаемого водяного пара. В этом случае, как показано в работе [5] при повышенных статических давлениях увеличение массы водяного пара внутри кавитационной камерны с ростом температуры СЛВ происходит менее интенсивно по сравнению со случаем, когда статическое давление равно атмосферному. В частности, коэффициент концентрации пара $C_{пара}$, определяемый по выражению (10) при статическом давлении, превышающем атмосферное, с ростом температуры принимает меньшие значения.

$$C_{пара} = \frac{M}{M_0} = \frac{\rho_t}{\rho_0} \left(\frac{r_{max}}{r_{max0}} \right)^3, \quad (10)$$

где M – масса пара в полости при r_{max} для данной температуры и давления; M_0 – масса пара в полости при r_{max0} при нормальных условиях; ρ_t и ρ_0 – плотность пара для данной температуры и для температуры 20°C соответственно.

Основной технической сложностью процесса суперкавитации является неустойчивость паровой каверны, возникающей в ходе движения СЛВ внутри рабочей камеры кавитатора. Одним из вариантов решения этой проблемы может являться искусственная кавитация, когда в общий объем паровой области в определенном соотношении подается воздух. В этом случае для устойчивого существования паровой каверны внутри кавитационного канала и устранения возможности размывания ее кормовой части необходимо постоянно отслеживать длину ее стационарного участка. С этой целью во время исследований была разработана технологическая схема подключения многоканального датчика вакуума к внешним стенкам кавитационной камеры. Она показана на рисунке 4.

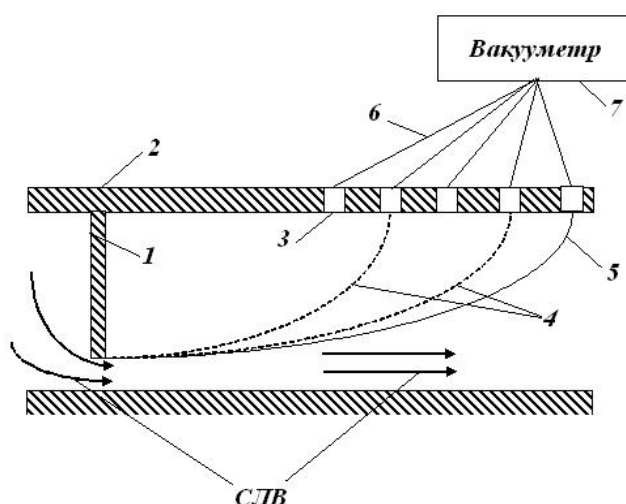


Рисунок 4 – Технологическая схема контроля длины суперкаверны:
 1 – кавитатор; 2 – стенки рабочей камеры канала; 3 – створы измерения давления; 4 – текущее положение контура суперкаверны; 5 – рабочее положение контура суперкаверны; 6 – линии отбора давления

Стационарное положение пространственных границ суперкавитационной каверны внутри рабочей камеры может смещаться как вправо (рост каверны), так и влево (схлопывание каверны). Наиболее характерным при работе сепаратора является вариант уменьшения размеров каверны. В этом случае ее внешняя граница от самого крайнего правого положения (на рис. 4 положение 5) будет смещаться в сторону входной границы (на рис. 4 положение 4). При таком смещении главным параметром, указывающим на положение разделительной границы между потоком СЛВ и насыщенным водяным паром, будет являться величина давления внутри каверны. Если на верхней крышке рабочего канала величина P будет превышать $P_{н.н.}$, то это означает, что размеры каверны изменились. По этой причине в своем технологическом исполнении верхняя крышка кавитатора должна содержать ряд створов для подключения линий автоматизированного цифрового вакуумметра. Поскольку внутри каверны давление всегда равно давлению насыщенного пара, при данной температуре $P_{н.н.}$ смещение границы каверны приведет к тому, что крайние правые линии измерения давления будут воспринимать повышенное давление на порядки превышающее величину $P_{н.н.}$. Такой способ контроля длины каверны, помимо своей простоты, характеризуется высокой надежностью, предоставляя в последующем возможность управления процессом сепарации СЛВ путем регулирования расходно-напорными характеристиками кавитационного канала.

В ряде технологических случаев исходный состав СЛВ будет являться величиной переменной, что может оказать существенное влияние на главный рабочий параметр сепаратора – его производительность. Вне зависимости от исходных характеристик обрабатываемого потока СЛВ в ходе его сепарации необходимо постоянно поддерживать неизменной величину массового расхода получаемого водяного пара.

Разработанная конструктивно-технологическая схема изменения производительности кавитационного судового сепаратора при переменности состава СЛВ вод показана на рисунке 5. В ее основе лежит регулирование расходно-напорными характеристиками сепарационной установки и автоматизированное изменение в случае необходимости схемы гидравлической сети сепаратора. При работе схемы сепарации предполагается, что в потоке отсутствуют крупные механические включения, а по своему составу он является однородным.

Работа схемы подразумевает автоматическое управление процессом сепарации на основе показаний измерителя концентрации 2, консистомера 3 и манометра 6. Для каждого из трех возможных случаев работы системы пересчет характеристик необходимо осуществлять следующим образом.

Первый вариант работы установки – штатный режим. Поток СЛВ характеризуется нормативным диапазоном плотности и концентрации нефтесодержащих примесей.

При работе сепаратора подача СЛВ осуществляется по линии 1. В случае, если плотность и состав СЛВ не выходят за пределы штатного диапазона судового сепаратора, при помощи насоса 4 создается необходимое давление на входе в рабочую камеру кавитационного канала 9.

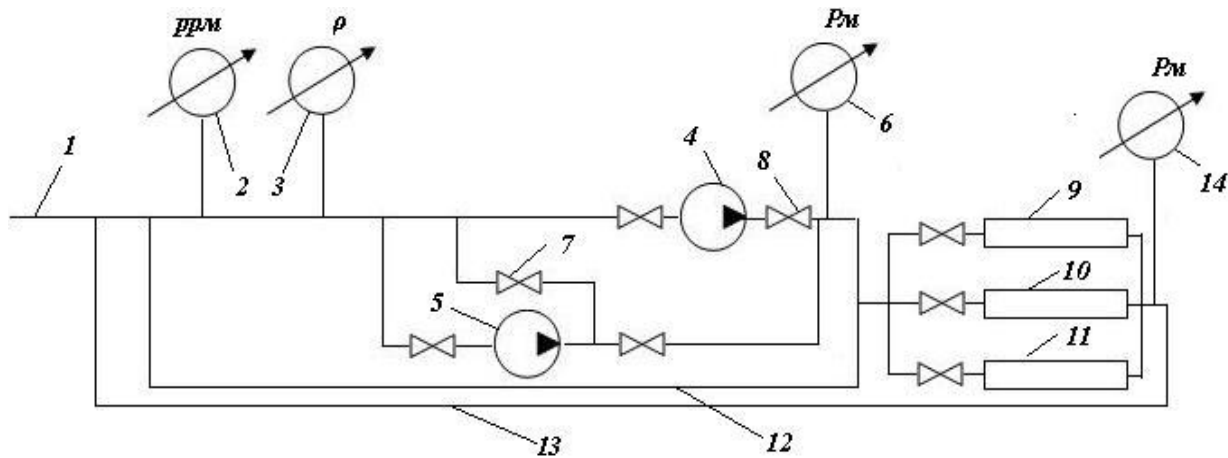


Рисунок 5 – Схема изменения производительности сепаратора
 1 – линия подачи СЛВ; 2 – измеритель концентрации; 3 – консистометр;
 4, 5 – насос; 6, 14 – манометр; 7, 8 – клапан; 9, 10, 11 – кавитационный канал;
 12 – внутренний контур обработки; 13 – внешний контур обработки.

Расчет сети, т.е. величины давления развиваемого насосом 4 осуществляется по уравнению

$$H_{\text{м}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\rho g} + \left(\sum \zeta + \frac{0,3164 l}{\sqrt[4]{\text{Re}} d} \right) \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4} + \frac{0,3164 L V^2}{\sqrt[4]{\text{Re}} H 2g}, \quad (11)$$

Численное значение $P_{\text{вых}}$ в уравнении (11) должно браться по показаниям манометра 14. Сам манометр необходимо устанавливать непосредственно на выходе из рабочей камеры кавитационного канала.

Второе слагаемое в уравнении (11) соответствует потерям напора в рабочей камере кавитатора. Третье слагаемое соответствует потерям напора во всей гидравлической сети сепаратора, включая суммарные потери по длине и во всех местных сопротивлениях.

Второй вариант работы установки – плотность потока СЛВ, а также концентрация примесей в них характеризуются пониженными (по сравнению с нормативными) значениями.

При таком варианте работы сепаратора необходимо увеличивать его производительность. Для этого, как видно на рисунке 5, в разработанной технологической схеме предусмотрен ввод в работу дополнительных рабочих кавитационных каналов. Они должны быть геометрически идентичными первому каналу и их необходимо включать в конструктивную схему сепаратора по схеме параллельного гидравлического соединения. В этом случае, с целью увеличения общего расхода обрабатываемого потока, перед каждой рабочей секцией происходит автоматическое открытие клапана, а в системе автоматизированного управления пересчет

характеристик сети должен производиться по правилам расчета параллельного соединения:

- суммарный расход в n числе камер сепарации:

$$Q = \sum_1^n Q_i, \quad (12)$$

- потери напора на каждой линии

$$\sum h_1 = \dots = \sum h_n = \frac{P_{\text{вых}}}{\rho g} + \left(\sum \zeta + \frac{0,3164 l}{\sqrt[4]{\text{Re}} d} \right) \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4}, \quad (13)$$

Для сепаратора СЛВ в целом конечное значение потребного напора должно увеличиваться на численное значение, полученное по выражению (13). Другими словами, к текущему значению величины напора, развиваемого насосом 4 (см. рис. 5), добавляется еще численное значение

$\sum_1^n h_n$. При автоматическом пересчете характеристик сети величина n должна соответствовать числу введенных в действие дополнительных кавитационных рабочих каналов.

Третий вариант работы установки – плотность потока СЛВ и концентрация примесей в нем увеличилась по сравнению с предустановленными нормативными значениями.

При таком режиме работы сепаратора рабочий насос 4 может не обеспечивать расходно-напорные характеристики сети, что будет приводить к срыву ее характеристики или, что то же самое, к появлению явления помпажа. С эксплуатационной точки зрения такой вариант работы установки является самым нежелательным. В этом случае возникновение вибраций и срыв подачи могут в конечном итоге привести к разгерметизации участка с кавитационной суперкаверной и к механическим поломкам всей гидравлической системы нагнетания.

Для устранения приведенных недостатков в линию обработки 12 по схеме последовательного включения путем открытия клапана 7 должен вводиться в работу дополнительный насос 5.

Величина повышения давления в системе автоматизированного управления при подобном варианте эксплуатации сепаратора должна пересчитываться по правилам расчета последовательного гидравлического соединения:

- суммарный расход в камерах сепарации:

$$Q = Q_i, \quad (14)$$

- потери напора на каждой линии обработки СЛВ

$$\sum h = \sum_1^n h_i = n \left[\frac{P_{\text{вых}}}{\rho g} + \left(\sum \zeta + \frac{0,3164 l}{\sqrt[4]{\text{Re}} d} \right) \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4} \right], \quad (15)$$

Для трех возможных режимов работы сепаратора, приведенные расчетные соотношения записывались с учетом равенства скоростных напоров на входе и выходе из рабочей камеры кавитационного канала. В более общем случае скорости в начале и конце рабочей камеры сепарации должны быть различны. По этой причине выражение для потребного напора, необходимого для работы разработанного контура сепарации, должно содержать разность входного и выходного скоростных напоров. Принимая, что внутри рабочей камеры кавитатора режим движения потока СЛВ соответствует турбулентному течению коэффициент Кориолиса выбираем равным $\alpha = 1$, и тогда

$$H_n = \frac{v_k^2 - v_n^2}{2g} + \sum h + \frac{p_k}{\rho g}, \quad (16)$$

Система управления судового сепаратора должна предоставлять возможность установки необходимого времени обработки СЛВ и обеспечивать регулировку конечной концентрации воды в обрабатываемом потоке. Корректировка времени обработки должна осуществляться на основании исходной информации по составу и количеству рабочего объема СЛВ.

В том случае, когда время обработки не является определяющим фактором, возможно управлять величиной мощности, потребляемой нагнетательным оборудованием в ходе процесса сепарации. Снижение величины динамического давления в технологическом контуре обработки СЛВ будет однозначно приводить к падению суммарной мощности потребляемой на процесс обработки СЛВ.

Выводы:

1. Выполненный анализ методов обработки судовых льяльных вод показал, что все они характеризуются одним общим недостатком – в ходе сепарации выходным продуктом является вода и при их использовании качественное получение и сбор вторичных продуктов нефтехимии получаемых в ходе разделения невозможно.

2. Основными факторами, влияющими на процесс параобразования при заполнении паром кавитационной каверны, относятся температура и статическое давление. При этом коэффициент поверхностного натяжения и вязкость среды при неизменности числа кавитации потока СЛВ не изменяют размеры кавитационной полости.

3. Разработанная конструктивно-технологическая схема изменения производительности кавитационного судового сепаратора при переменности состава СЛВ вод основывается на регулировании расходно-напорными характеристиками сепарационной установки и автоматизированном изменении схемы гидравлической сети сепаратора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко Ю. Н. Исследования суперкавитационных течений / Ю. Н. Савченко // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – Том 9(81) – № 2-3.
2. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашини и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев // Изд-во Машиностроение. – М., 1982. – 423 с.
3. Гийон М. Исследование и расчет гидравлических систем / М. Гийон. – М. : Машиностроение, 1964. – 388 с.
4. Hickling R. Effect of thermal conduction in sonoluminescence / R. Hickling // Journal of the Acoustical Society of America. – 1963. – v. 37. – n. 7, p. 967-974.
5. Бронин Ф. А. Исследование кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел в ультразвуковом поле высокой интенсивности: дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. / Ф. А. Бронин. – М., 1967. – 299 с.

Леонов В.В., Осташко Є.А., Ткаченко І.В., Старостін С.М. СЕПАРАЦІЯ СУДНОВИХ ЛЬЯЛЬНИХ ВОД НА ОСНОВІ ПРОЦЕСУ СУПЕРКАВІТАЦІЇ

В роботі розглянуто основні принципи кавітаційного методу сепарації суднових льяльних вод. Розглянуто основні теоретичні аспекти кавітації при обробці СЛВ. Приведено опис схеми підвищення продуктивності сепаратора.

Ключові слова: кавітація, суперкаверна, сепараційна установка льяльних вод.

Leonov V.V., Ostashko E.A., Tkachenko I.V., Starostin S.N. SEPARATION OF SHIP BILGE WATER ON THE BASIS OF SUPERCAVITATION PROCESS

Basic principles of cavity separation method for bilge water treatment are stated. Main theoretical aspects of cavitation for bilge water separation are considered. The scheme for increasing the separator production is described.

Keywords: cavitation, superpocket, setting for separating bilge water.