

УДК 666.961.

СТАТИЧЕСКИЕ СУПЕРКАВИТАТОРЫ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

О.А. Петров, П.Е. Вайтехович.

Белорусский Государственный Технологический Университет

Предложены и исследованы конструкции статических суперкавитаторов с дополнительной закруткой потока для гидродинамической обработки материалов. Проведены экспериментальные исследования по обработке волокнистых материалов, находящихся в водной среде в виде суспензий. Оценена работа исследуемых аппаратов по энергетическим затратам и эффективности. Получены эмпирические формулы зависимости гидравлического сопротивления и степени распушки материала от скорости жидкости для каждого суперкавитатора. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований сделан вывод о целесообразности расширения практического применения рассматриваемых аппаратов для интенсификации ряда процессов химической промышленности.

Идея использовать кумулятивное действие схлопывающихся кавитационных пузырьков и развитое кавитационное течение для осуществления и интенсификации различных технологических процессов (эмульгирование, гомогенизация, диспергирование, активация и др.) привела к созданию всевозможных гидродинамических и акустических кавитирующих аппаратов. Однако, задачи разработки новых конструктивных решений, исследования и оптимизации уже существующих конструкций таких аппаратов, а также расширение области их применения, остаются актуальными и по сей день.

Кинетика процессов понижения прочности твердых тел, находящихся в жидкой среде, обусловлена скоростью адсорбции на поверхностях разрушения в момент их образования. Поэтому наиболее благоприятны такие механические воздействия, при которых деформация протекает медленно по сравнению со скоростью миграции жидкости по поверхности, а также периодические силовые воздействия, обеспечивающие проникновение жидкости вглубь микротрещин [1]. Наиболее приемлемым в этом случае может быть скоростное гидродинамическое воздействие.

С точки зрения кинетики гидродинамических процессов, создание кавитационного режима течения может оказаться наиболее энергетически выгодным, так как вместо монотонного воздействия коллапсирующие кавитационные пузырьки обеспечивают импульсное энергетическое воздействие на частицы обрабатываемого материала, причем импульсное как во времени, так и в пространстве.

Основной приоритет суперкавитации и аппаратов на ее основе в сравнении с другими видами кавитационной обработки (ультразвуковая, виброкавитационная, турбулизирующая и т. д.), заключается в том, что возникающая за обтекателем при определенных условиях суперкаверна простирается достаточно далеко за пределы поверхностей рабочих органов аппарата, предотвращая кавитационное разрушение последних. Поле кавитационных пузырьков генерируется преимущественно нестационарной хвостовой частью суперкаверны. То есть, изменяя параметры суперкаверны, можно регулировать и интенсивность обработки, которая в этом случае определяется в основном количеством и размерами коллапсирующих пузырьков. Как известно, при коллапсе (схлопывании) кавитаци-

онных пузырьков температура вблизи пузырька повышается на 500–800°C, а возникающие ударные волны могут привести к высоким перепадам давления (до 400 МПа) в окружающей пузырьки жидкости [2]. Совокупность таких микровзрывов, вызывающих кумулятивные микроструи и микровихри по объему своего распространения, приводят к изменению свойств обрабатываемой жидкости и материалов в ней находящихся (суспензии, эмульсии). Возникающих гидродинамических усилий может быть недостаточно для окончательного разрушения твердых материалов, однако известны, технологические процессы, где необходимо как раз такое, падающее воздействие. Именно применительно к таким процессам и исследовались предложенные аппараты.

Исследуемые статические суперкавитаторы (далее просто кавитаторы), суперкаверна в которых создается посредством обтекания неподвижных преград специальной конфигурации в виде конусов, сфер, пластин и т. д., по сравнению с другими известными суперкавитирующими аппаратами (динамическими, струйными), обладают рядом преимуществ: минимальные капитальные затраты на их производство, отсутствие подвижных элементов в эксплуатационном режиме, высокая энергонапряженность и минимальные энергозатраты при достижении требуемой эффективности, достаточно широкий диапазон регулирования интенсивности обработки.

Таким образом, для экспериментальных исследований за базовый вариант был выбран известный кавитатор в виде сопла Вентури с коническим обтекателем (струйный кавитатор) [3]. Конус-обтекатель, укрепленный на штоке, установлен в диффузоре сопла. Шток может перемещаться вдоль оси сопла, изменяя тем самым загромождение потока по сечению кавитатора, и соответственно режим течения жидкости. В результате можно достаточно легко регулировать длину каверны и интенсивность образования пузырьков. К недостаткам такого кавитатора можно отнести высокое гидравлическое сопротивление из-за высоких скоростей жидкости и высокой степени загромождения потока в диффузоре.

Предположительно, от этих недостатков можно избавиться, используя закрутку потока. Большой опыт исследования закрученных потоков [4] показал, что после разного рода завихрителей образуется полость с давлением ниже атмосферного. Эта полость и есть суперкаверна. Причем, при закрутке потока каверна будет образовываться при значительно меньших среднерасходных скоростях. Поэтому гидравлическое сопротивление таких кавитаторов должно быть ниже.

Были предложены лопастной и винтовой кавитаторы, в которых жидкость приобретает закрутку [5]. В первом случае это достигается за счет установки плоских статических лопастей, во втором – винтовой лопасти (одного витка шнека). В обоих случаях лопасти закреплены на стержне с коническими хвостовиками, который выполняет функции обтекателя и способствует образованию каверны.

Эти относительно простые устройства не только образуют каверны, но и создают большой градиент скоростей по сечению, что дополнительно способствует разрыву связей между частицами обрабатываемого материала, способствует гомогенизации и ускорению химических превращений. Величины гидродинамических сил может быть достаточно для разрыва связей между волокнами (целлюлоза, химические волокна, асбест), разрушения флокул, отделения фибрилл и т. д.

При обработке некоторых волокнистых суспензий большие проблемы могут возникнуть из-за наматывания волокон на турбулизирующие вставки кавитаторов. Для устранения этого недостатка предложен пластинчатый кавитатор. Он выполнен в виде продольных радиальных пластин, с отогнутыми концами. Эти отогнутые концы пластин-лопастей подкручивают поток и одновременно выполняют функции кавитационной решетки. Перед закруткой волокнистая суспензия проходит через прямые участки лопастей, где разрушаются флокулы и скрученные пучки. Волокнистый материал как бы “расчесывается” на этих прямых участках лопастей. На внутренних кромках отогнутых концов пластин устанавливаются обтекатели сфериче-

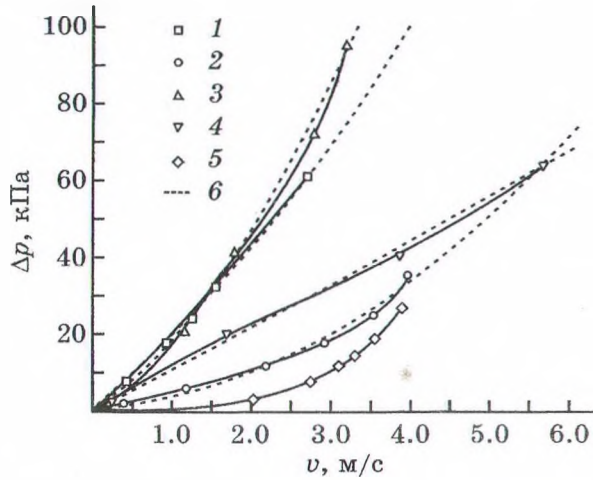


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости потока (для лопастного – 1, пластинчатого – 2, струйного – 3 и винтового – 4 кавитаторов; в системе без кавитатора – 5; расчетные данные – 6).

ской формы для создания развитого кавитационного течения по всему объему рабочей камеры гидродинамического аппарата.

Оценить работу кавитаторов можно двумя параметрами – затратами энергии на проведение процесса и эффективностью. Энергетическим параметром для гидравлических систем является мощность привода насоса, которая определяется гидравлическим сопротивлением. Поэтому гидравлическое сопротивление кавитатора являлось одним из основных измеряемых параметров.

Гидродинамические характеристики кавитаторов изучались на воде. На рис. 1 приведены графики зависимости гидравлического сопротивления Δp от скорости жидкости в трубопроводе v для всех кавитаторов. Как показали эксперименты, характерной особенностью всех кавита-

торов с закруткой потока является то, что каверна у них более устойчива, нет её срыва и захлебывания. Эта устойчивость достигается в первую очередь за счёт воздействия центробежной силы, возникающей при закрутке.

Обработка экспериментальных данных дала возможность получить эмпирические зависимости $\Delta p=f(v)$ для каждого кавитатора. Естественно предположить, что между величинами гидравлического сопротивления и скорости существует квадратичная зависимость. Поэтому она представлена в виде полинома второй степени

$$\Delta p = a \cdot v^2 + b \cdot v + c; \quad (1)$$

$$v \in [0;6],$$

Ниже (таблица 1) приведены значения коэффициентов a , b и c для всех кавитаторов.

По полученным формулам проведен расчет гидравлического сопротивления. Расчетные зависимости показаны на рис. 1 в виде штриховых линий. Погрешность расчетов не превышает 1%.

Видно, что гидравлическое сопротивление всех кавитаторов возрастает с увеличением скорости жидкости. Наибольшее гидравлическое сопротивление имеет струйный кавитатор, близок к нему по этому параметру и лопастной. Значительно меньше гидравлическое сопротивление у винтового и, особенно, у пластинчатого кавитатора, который повышает общее сопротивление системы не более чем на 10 кПа.

Эффективность работы кавитаторов зависит от конкретного обрабатываемого материала и требуемых характеристик его обработки. Первоначально кавитаторы исследовались при обработке воло-

Таблица 1. Расчетные данные зависимости $\Delta p=f(v)$.

№	Тип статического суперкавитатора	Значения коэффициентов			Уравнение зависимости $\Delta p=f(v)$ { Δp [кПа], v [м/с]}, вида $\Delta p=a \cdot v^2+b \cdot v+c$
		a	b	c	
1	струйный	4.85	13.66	-0.0584	$\Delta p=4.85 \cdot v^2+13.66 \cdot v-0.058$
2	лопастной	1.97	17.20	-0.0089	$\Delta p=1.97 \cdot v^2+17.2 \cdot v-0.009$
3	винтовой	0.14	10.36	0.5264	$\Delta p=0.14 \cdot v^2+10.36 \cdot v+0.526$
4	пластинчатый	1.75	1.17	0.9086	$\Delta p=1.75 \cdot v^2+1.17 \cdot v+0.9086$

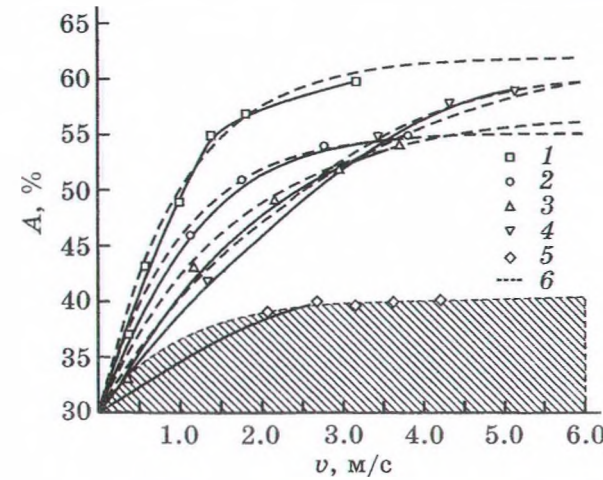


Рис. 2. Зависимость степени распушки от скорости потока (для лопастного – 1, винтового – 2, струйного – 3 и пластинчатого – 4 кавитаторов; для системы без кавитатора – 5; расчетные данные – 6).

нистых материалов (химические волокна, целлюлоза, хризотил-асбест), являющихся дисперсной фазой различных суспензий. Однако, в качестве базовой модельной среды была выбрана асбестовая суспензия. Серпентиновый асбест, известный как хризотил, составляет дисперсную фазу этой суспензии и представляет собой основной силикат магния $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. Выбор такой модельной среды был обусловлен её доступностью, легкостью перемешивания хризотила с водой (повышенная гидрофильность асбеста), простотой проведения лабораторных анализов. Разбавление асбеста водой предотвращает пылевыведение и позволяет избежать негативных последствий вдыхания асбестовой пыли. Вместе с тем, высокая упругость, прочность волокон, химическая стойкость, очень высокая адсорбционная способность, особая связывающая способность, устойчивость против загнивания, способность задерживать бактерии, вредные вещества и радиационное излучение, высокое электрическое сопротивление и огнестойкость – те полезные свойства хризотил-асбеста, которыми во всей гамме не обладает ни один из известных материалов-заменителей асбеста. Все это является причиной использования этого материала в ряде реальных технологий.

С необходимостью разделения скрученных волокон, в особенности товар-

ных материалов, приходится сталкиваться в большинстве технологий их дальнейшего использования (приготовление волокнистых суспензий, применение волокнистых добавок в качестве армирующего материала и т. д.).

Эффективность обработки хризотило-вой суспензии оценивается степенью распушки асбеста A . Экспериментально этот параметр замерялся стандартным способом определения степени распушки хризотил-асбеста по удельному объёму осадка, выделенного из порции водной суспензии [6].

Экспериментальные исследования показали, что степень распушки для всех кавитаторов возрастает с увеличением скорости жидкости в трубопроводе (рис. 2).

Далее, с учетом экспериментальных данных, можно оценить непосредственный вклад каждого кавитатора в процесс обработки материала за один проход через аппарат. Уравнение функции $A=f(v)$ в исследуемом интервале скоростей можно записать в форме экспоненциальной зависимости вида

$$A = a_1 + b_1 \cdot e^{-K \cdot v}, \quad (2)$$

С физической точки зрения уравнение (2) можем преобразовать:

$$A = A_0 + A_n + A_k - (A_n + A_k) \cdot e^{-K \cdot v}, \quad (3)$$

или окончательно:

$$A = A_0 + (A_n + A_k) \cdot (1 - e^{-K \cdot v}), \quad (4)$$

В формулах (3, 4) введены следующие обозначения: A_0 – начальная степень распушки материала (для хризотил-асбеста $A_0=30\%$, что соответствует значению этого параметра в производстве асбестоцементных изделий перед гидродинамической обработкой асбестовой суспензии), %; A_n – степень распушки материала в установке без кавитатора, %; A_k – эффективная степень распушки для конкретного кавитатора, %; K – поправочный коэффициент.

Значения составляющих уравнения (2), полученные в результате аппроксимации кривых зависимости $A=f(v)$ для

Таблица 2. Расчетные данные зависимости $A=f(v)$.

№	Тип статического суперкавитатора	A_0 , %	A_n , %	A_k , %	K
1	лопастной	30	10	22	1
2	винтовой			15.3	1
3	струйный			17	0.6
4	пластинчатый			24	0.35

всех кавитаторов оформлены в виде таблицы 2.

Сравнение экспериментальных и рассчитанных по формуле (4) значений степени распушки (штриховые линии на рис. 2) показывают, что их расхождение не превышает 3%.

Таким образом очевидно, что все кавитаторы за один проход дают степень распушки на 15÷24% выше, чем в случае их отсутствия. Сравнение кавитаторов дает преимущество кавитаторам с закруткой потока. Это подтверждает наше предположение о том, что у них эффект разрушения связей между волокнами достигается не только за счёт кавитационного воздействия, но и за счёт градиента скоростей и турбулентных пульсаций в вихрях. Кроме того, у этих кавитаторов значительно шире диапазон устойчивой работы.

Для повышения эффективности любого кавитирующего аппарата, будь то гидродинамический излучатель (ГДИ), дезинтегратор, высокоскоростная мешалка или статический суперкавитирующий аппарат, необходимо чтобы энергия кавитационного воздействия была направлена именно на обрабатываемый материал и не воспринималась рабочими поверхностями оборудования во избежание их эрозионного разрушения, что зачастую осуществить очень затруднительно. Предложенные аппараты позволяют реализовать этот принцип. При этом закрутка потока дает возможность дополнительной интенсификации процессов, протекающих в рабочей зоне аппарата.

Несложный монтаж исследуемых суперкавитирующих вставок в транспортирующие трубопроводы, циркуляционные контуры и др. наряду с их эффективностью и простотой эксплуатации позволяет интенсифицировать многие гидромеханические и тепло-

массообменные процессы, химические превращения. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования, а также примеры эффективного использования подобных аппаратов для интенсификации процессов в различных отраслях народного хозяйства указывают на целесообразность расширения практического применения рассматриваемых аппаратов в химической промышленности.

Библиография

1. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. // М.: Химия, 1990, 208 с.
2. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений. // Л.: Судостроение, 1978, 224 с.
3. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. // Киев: Вышш. шк., 1986, 47 с.
4. Вайтехович П.Е. Разработка и исследование вихревых массообменных аппаратов. // Дисс. – канд. техн. наук. – Мн.: БТИ им. С.М. Кирова, 1982.
5. Вайтехович П.Е., Петров О.А. Исследование и оптимизация гидродинамических кавитационных диспергаторов // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганич. в-в. Вып. VIII, 2000, с. 237–244.
6. Тимашев В. В, Леонов И. И. Технический анализ и контроль производства вяжущих материалов и асбестоцемента // М.: Стройиздат, 1984, 288 с.