УДК 532.528
DOI

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОСТИ В КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЯХ. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Иваницкий Г.К., д.т.н., Целень Б.Я. к.т.н., Недбайло А.Е., к.т.н., Коники А.В., к.т.н.
Институт технической теплофизики НАН Украины

Аннотация. Гидродинамическая кавитация используется в технологиях дегазации как эффективный метод удаления растворенных газов и/или свободного газа в виде пузырьков из различных жидкостей. Математические модели кавитационной дегазации недостаточно представлены в литературе. Поэтому создание достоверной модели, описывающей дегазацию в кавитационных течениях, является важной фундаментальной и прикладной задачей. В статье рассматриваются основные проблемы, которые затрудняют создание надежной математической модели. С целью разработки такой модели нами был выполнен вычислительный эксперимент по деаэрации воды с использованием сопла Вентури в качестве гидродинамического кавитатора. Цель исследования заключается в установлении корреляции между гидродинамическими характеристиками течения и кинетикой кавитационного вскипания жидкости при сужении потока из-за присутствия в ней микро-пузырьков свободного газа. Установлено влияние геометрии сопла и режимных параметров на эволюцию кавитационного кластера и на уровень динамических эффектов в потоке жидкости в сопле. Описан метод удаления растворенных или свободных газов из жидкости, которая под действием высокого давления течет через сопло со скоростью достаточной для активации газовых зародышей и начала кавитационного вскипания. Кавитатор на выходе соединяется через короткую трубу с вакуумируемой емкостью. Показана необходимость при исследовании дегазации конкретной жидкости провести предварительный анализ содержания в ней свободного газа. Рассмотрено влияние начального размера зародышей газа и их концентрации в жидкости на интенсивность процесса кавитационной дегазации.

Результаты данного исследования могут быть полезны при выборе и обосновании рациональной конструкции кавитационного дегазатора и оптимальных режимов его работы.

Ключевые слова: кавитационная дегазация, деаэрация, кавитационный кластер, газовые зародыши, сопло Вентури.

STUDY OF LIQUID DEGASSING IN CAVITATING FLOWS. PROBLEMS OF MODELING

Ivanitsky G.K., DSc., Tselen B.Ya., PhD., Nedbaylo A.E., PhD., Konyk A.V., PhD,
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Abstract. Hydrodynamic cavitation is used in degassing technologies as an effective method for removing dissolved gases and/or free gas in the form of bubbles from various liquids. Mathematical models of the degassing in cavitating flows are not yet developed and presented in the literature quite insufficiently. Therefore, development of a reliable model for simultaneous cavitation and liquid degassing is an important fundamental and applied task. Key issues that make it difficult to create a reliable mathematical model for the degassing of liquids are considered. In order to develop the mathematical model of liquid degassing, computational experiments on water deaeration were performed using the profiled Venturi nozzle as a hydrodynamic cavitator. The aim of the present investigation is to find a correlation between global hydrodynamic flow characteristics and cavitation induced undissolved gas fractions generated behind generic flow constrictions such as an orifice or Venturi tube. Evolution of the cavitation cluster and the level of the dynamic cavitation effects in liquid flow within a Venturi nozzle, depending on the design features and the mode of operation of this type cavitator, are considered. A system is described for rapidly remove dissolved gasses or volatile contaminants from a liquid, which is forced at a sufficient pressure and velocity through a Venturi nozzle, designed and operated in a fashion to produce vapor- gas micro-bubbles. The outlet of the cavitator is connected through a short pipe with a vacuum tank, in which a constant pressure is maintained close to the saturated vapor pressure of the processed liquid at a given temperature. It was shown, that in any cavitation degassing study the liquid must be monitored by measuring the number of nuclei present in the liquid. The influence of the initial size of gas nuclei and the concentration in the liquid on the intensity of the cavitation degassing process is considered.

The results of this study may be useful in selecting and justifying the rational design of the cavitation degasser and the optimal modes of its operation.

Key words: cavitation degassing, deaeration, cavitation cluster, gaseous nuclei, Venturi nozzle.

Введение. Технологии кавитационной дегазации (КДГ) жидкостей применяются в различных производствах – в пищевой, химической отраслях промышленности, в энергетике, металлургии, в системах водоподготовки

Методы КДГ используются при необходимости удаления из жидкостей свободного газа, всегда присутствующего в жидкостях в виде микропузырьков, а также для деаэрации воды. Содержащиеся в жидкостях свободные газы, такие как O_2, CO_2, H_2S , химически более агрессивны, чем те же газы в растворенном состоянии [1,2]. Присутствуя в обычной воде, они выступают в качестве катализаторов коррозионных процессов. Метод особенно эффективен при дегазации пересыщенных жидкостей, когда количество свободного газа в пузырьковой форме существенно превышает его равновесную концентрацию. Так, например, конденсат дымовых газов на выходе из котлоагрегата содержит 70 мг/л CO_2 , тогда как его растворимость в воде при 20°C составляет только 0,47 мг/л. Кавитационные методы отличаются высокой производительностью и низкими энергозатратами по сравнению с другими методами дегазации.

Основные принципы кавитационной дегазации. Для реализации явлений кавитации необходимо быстро сбросить давление в жидкости до значений ниже давления насыщенного пара при данной температуре, ($p_l < p_{sat}(T_l)$), что приводит к вскипанию жидкости – формированию и быстрому росту ансамбля парогазовых пузырьков, т.н. кавитационного кластера. Последующее повышение давления до значений $p_l > p_{sat}(T_l)$ приводит к быстрому сжатию пузырьков и их коллапсу (схлопыванию) с выделением высокоамплитудного импульса давления ($p_{imp} \propto 100 \div 500$ МПа). [1-5]

Способность создавать сильные дискретно-импульсные динамические воздействия делают кавитацию одним из наиболее действенных способов достижения высоких энергетических показателей в технологиях, связанных с обработкой жидких дисперсных сред. Кавитационные механизмы успешно используются сегодня в биотехнологиях, благодаря возможности оказывать направленное действие на микро- и нано уровне на супрамолекулярные структуры, клетки микроорганизмов, управлять кинетикой протекания химических и биохимических реакций в растворах [5].

Известно, что эффективность кавитационного воздействия в этих операциях тем выше, чем меньше начальное газосодержание жидкости [2,4]. Поэтому во многих кавитационных технологиях предварительная деаэрация жидкости является важной стадией проведения операции [1,6].

Явления гидродинамической кавитации возникают в гидравлических системах, где поток жидкости претерпевает местное сужение с последующим расширением, например, в запорных и регулирующих органах, диафрагмах и др. В лабораторных исследованиях обычно используются сопла Вентури или диафрагмы с одним или несколькими отверстиями, схемы которых приведены на рис.1. Эти же устройства применяются и для изучения механизма дегазации жидкостей в кавитационных течениях [5-12]. В зоне сужения потока, где выполняется условие $p_l < p_{sat}(T_l)$, происходит интенсивный рост парогазовых пузырьков, которые необходимо затем удалить из жидкости, исключив при этом возможность коллапса пузырьков на второй стадии процесса кавитации $p_l > p_{sat}(T_l)$.

Рис. 1 Схема сопла Вентури (а) и пластинки с отверстием (б).

Для этого вскипающий поток после кавитирующего устройства подается в форме факела распыла в вакуумную емкость, в которой поддерживается постоянное давление $p_{vac} \leq p_{sat}(T_l)$, и где происходит разделение фаз. Пар с помощью вакуум-насоса удаляется из емкости, а деаэрированная жидкость с помощью ц/б насоса возвращается в загрузочную камеру.

В последние годы опубликовано большое количество статей по исследованию процессов КДГ, выпущены патенты на способ и на конструкцию кавитационных дегазаторов [1,7-11]. Анализ этих публикаций свидетельствует об отсутствии общепринятых четких представлений о физической природе и о механизмах кавитационных явлений, протекающих на микроуровне, и общего подхода к анализу полученных результатов.

В данной статье кратко рассмотрены основные проблемы и задачи, связанные с моделированием процессов КДГ, и обсуждаются возможные пути их решения.

Состояние проблемы и анализ последних публикаций. Моделирование процессов КДГ базируется на анализе результатов экспериментов по деаэрации жидкости, проводимых с использованием в качестве кавитатора сопла Вентури [5,8,9-11] или пластинки с отверстием [5,7]. Обработка жидкости (обычно вода) изначально находится в емкости, где с помощью воздушного компрессора поддерживается давление в диапазоне $p_1 \propto 1 \div 10$ бар, и где вода под действием высокого давления насыщается воздухом. Через кавитатор жидкость подается в емкость с пониженным давлением $p_2 < p_1$, которое контролируется манометром.

С помощью ротаметра измеряется объемный расход жидкости G_V , что позволяет рассчитать скорость потока на входе в кавитатор $v_1 = G_V/S_1$ и его скорость в узком сечении $v_s = G_V/S_c$, где S_1 и S_c - соответственно, площадь входного и узкого сечений кавитатора. (см.рис.1). При заданном $p_2 = p_{vac}$ расход можно менять только счет изменения давление на входе p_1 .

Проблема 1. С повышением входного давления p_1 при постоянном p_{vac} скорость жидкости в узком сечении v_c возрастает, что, согласно уравнению Бернулли, сопровождается снижением локального давления p_v в этом сечении. При некотором значении p_1 давление p_v в узком сечении становится ниже давления насыщенного пара ($p_v < p_{sat}(T_l)$), что приводит к вскипанию жидкости и, как следствие, к “запиранию” потока [7,8]. С этого момента, который определяется как начало кавитации, при дальнейшем повышении давления на входе p_1 до сколь угодно высокого значения давление в узком сечении и далее вниз по потоку остается постоянным и строго и равным давлению насыщенного пара ($p_v = p_{sat}(T_l) = \text{const}$). Это значение p_v определяется как критическое давление кавитации ($p_v = p_{cr}$).

В исследованиях по гидродинамической кавитации в качестве базового критерия возникновения кавитации традиционно используется критическое число кавитации в виде [2,5,6,10]

$$\chi_{cr} = [p_1 - p_{sat}(T)] / (\rho_l v_0^2 / 2), \quad (1)$$

где ρ_l - плотность жидкости. Скорость жидкости на входе в кавитатор v_0 определяется по формуле

$$v_0 = \sqrt{[p_1 - p_{sat}(T)] / (\rho_l \cdot \xi_{0-c})}, \quad (2)$$

где ξ_{0-c} - сумма коэффициентов сопротивления между сечениями 0 и c, которая для заданной геометрии кавитатора является постоянной. Из уравнений (1) и (2) следует, что число кавитации $\chi_{cr} \equiv \xi_{0-c}$, вне зависимости от свойств жидкости и степени ее насыщенности газом. Кроме того, в литературе существует различные определения числа кавитации, которые исследователи выбирают по своему усмотрению. Так в числителе правой части (1) вместо значений p_1 используется значение p_2 , а в знаменателе вместо скорости v_0 - скорость v_s [9]. Иногда в знаменателе вместо $\rho_l v_1^2 / 2$ используется разность давлений $p_1 - p_2$ [8]. Выбор любой из этих форм числа кавитации оправдан только в рамках конкретного эксперимента, хотя их физический смысл остается тем же, что и у числа χ_{cr} в формуле (1). При этом теряется смысл сравнения полученных данных с результатами других авторов. Число кавитации нельзя также использовать для масштабирования кавитационных аппаратов, поскольку становится общепризнанным, что процессы кавитации не масштабируются [1-3,6-9]. Из этого следует, что критическое число кавитации в принципе не может служить критерием подобия при моделировании гидродинамических течений.

Проблема 2. Эффективность процессов КДГ зависит от исходного газосодержания исследуемой жидкости, концентрации в ней свободного газа, а также от начального распределения микро-зародышей по размеру. Эти параметры, в качестве начальных условий, должны содержаться в модели, предназначенной для адекватного описания этих процессов. Существующие сегодня акустические и оптические методы регистрации микро-зародышей в жидкости дают только косвенную информацию относительно этих параметров. [1,2,6,8]. Известно, что основное количество свободного газа в воде содержится в наноразмерных пузырьках ($R_0 \propto 20 \div 100$ нм) с концентрацией $N_{b0} \propto 10^{-15} \text{ м}^{-3}$ [1,6]. Опубликованы данные относительно распределения по размеру микропузырьков воздуха в воде в интервале $R_0 = 3 \div 300$ мкм [6]. Проблема заключается в том, что даже при наличии такого рода данных их нельзя включить в модель. Стандартные математические модели способны описывать поведение только монодисперсного ансамбля пузырьков с заданной концентрацией и заданным начальным размером. Использование усредненных значений R_0 и N_{b0} приводит к большим погрешностям [6,9]. Необходимо искать возможности рационального использования существующих моделей для получения полезной информации.

Проблема 3. Модели, описывающие процессы КДГ, базируются на динамике единичного пузырька с использованием известного уравнения Рейля-Плессета [1,5,7,9]. Для описания эволюции совокупности пузырьков рассматривается изначально существующий сферический кластер с радиусом r_0 , состоящий из N

микропузырьков одинакового размера [5]. Рост кластера при сбросе давления обусловлен ростом единичного пузырька без какого-либо учета силового и термического взаимодействия, которые собственно и определяют интенсивность парообразования. Такие модели содержат большое число ограничений и подгоночных параметров, что облегчает достижение согласия с экспериментом. Такие упрощенные модели исключают возможность адекватного описания реальных процессов,

Проблема 4. Современные методики исследования процессов КДГ предусматривают возможность оптических измерений в пузырьковом потоке. С помощью видеосъемки под микроскопом или съятия и последующего анализа голограмм можно зафиксировать появление первых пузырьков для точной регистрации начала кавитации, определить размер и концентрацию пузырьков, структуру потока и т.п. Для этого в эксперименте исследуют каналы прямоугольного поперечного сечения с плоскими стеклянными стенками [1,7-9]. В частности, в качестве сопла Вентури используют два широких прямоугольных канала, соединенных узкой прямоугольной “горловиной” [7,9]. Такие конструкции обеспечивают высокое качество оптических измерений, но существенно искажают топологию, характер течения и общую картину кавитационных процессов. Вместе с тем, результаты экспериментов, проводимых на таких устройствах анализируются с помощью стандартных моделей, описывающих течения в цилиндрических каналах. При этом сами авторы указывают на недостатки такого подхода [1,8].

Проблема 5. В моделях процессов КДГ рассматривается преимущественно условие формирования парогазовой фазы в потоке на участке от входа в кавитатор до его узкого сечения. Существующие модели пока еще не могут адекватно описывать структуру и характеристики двухфазного потока на пути от кавитатора до вакуумной емкости. Видеосъемка указывает на зависимость структуры потока от размеров и формы кавитатора, а также от величины давления на входе и начальной загазованности жидкости. Наблюдается появление пристеночных суперкаверн [9,10], коалесценция пузырьков, в некоторых случаях - инверсия потока (переход пузырьковой структуры в капельную) и другие явления. Трудности моделирования двухфазных потоков пузырьковой и капельной структуры обсуждаются в работах [1,9].

Ниже представлены результаты вычислительного эксперимента по кавитационной деаэрации воды, выполненной на основе унифицированной модели кавитационных процессов.

Методика исследования. С целью разработки математической модели КДГ проведены вычислительные эксперименты по деаэрации воды с использованием в качестве кавитатора сопла Вентури, что позволяет генерировать больше пузырьков и увеличивать их время жизни, по сравнению с пластиной с отверстиями [1,5,6], а также обеспечивает возможность более точного теоретического анализа [1,5].

В данном исследовании использовалось сопло Вентури следующей геометрии: угол раскрытия конфузора $\alpha_{con}=60^\circ$, угол раскрытия диффузора $\alpha_{dif}=12^\circ$, диаметр канала перед конфузуром и на выходе из диффузора $D_0=5$ см, длина горловины сопла $L_{thr}=0,2D_0$.

Исследовались сопла с четырьмя диаметрами горловины D_{thr} - 1 см, 2 см, 3 см и 4 см. Длина канала от кавитатора до входа в вакуумную емкость $L_{tb}=2D_0=const$. Давление в вакуумной камере $p_{vac}=0,02$ атм = const. Результаты исследования, представленные в данной статье, получены при давлении на входе в кавитатор $p_0=4$ атм.

Анализ процесса формирования, роста и последующей эволюции парогазовых пузырьков выполнен на основе созданной в ИТТФ НАНУ математической модели динамики пузырькового ансамбля. [3]. В [3,4,12] приведены примеры использования модели для описания кавитационных явлений.

В отличие от известных моделей данная модель учитывает силовое взаимодействие пузырьков в ансамбле, что позволяет рассчитывать давление в жидкости внутри кластера ($p_{cl}=f(\tau)$) и определить момент начала кавитации. В модели использованы общепринятые допущения о монодисперсности пузырьков и об отсутствии их дробления и коагуляции.

В число начальных условий входит радиус газовых зародышей R_0 и их массовая концентрация N_b ($г^{-1}$), которая считается постоянной на протяжении всего процесса. Изменение давления в жидкости на участке от входа в конфузор и до выхода из горловины $p_l f(\tau)$ определялось по уравнению Бернулли, которое входит в число базовых уравнений модели.

В данном исследовании проведен многофакторный вычислительный эксперимент по переменным R_0 , N_b и d_{thr} . Исследования проведены при температуре воды $T_l=20^\circ C$.

Рис.2. Распределение микропузырьков воздуха в воде по размерам. Расчет по экспериментальным данным [6].

Была проведена предварительная оценка распределения по размеру газовых микропузырьков в воде. На основании обобщения совокупности экспериментальных данных по содержанию свободного воздуха в обычной воде, приведенных в работе [6], нами получена эмпирическая формула для оценки числа микропузырьков воздуха в единице объема воды в зависимости от их радиуса. Эта формула в виде $N_{b0} = AR_0^{-1,4}$ (R_0 - в $\mu\text{м}$, N_{b0} - см^{-3}) с хорошей точностью аппроксимирует экспериментальные данные в интервале $R_0 = 0,5 \div 20 \mu\text{м}$.

Полученная зависимость, представленная в графическом виде на рис.2, позволяет при задании начального размера пузырьков в мономодальном ансамбле R_0 определить их концентрацию N_{b0} и точнее прогнозировать

развитие ситуации при сбросе давления.

Обсуждение результатов исследования. В задаче исследования входило определение скорости изменения давления в жидкости внутри кластера ($p_{cl} = f(\tau)$) в зависимости от изменения внешнего давления в жидкости $p_l = f(\tau)$ в конфузорной части сопла, которое рассчитывается по уравнению Бернулли.

В воде находится большое число равновесных газовых зародышей в интервале $R_0 = 0,1 \div 100 \mu\text{м}$, которые при сбросе внешнего давления могут активироваться и стать центрами кавитации. Критическое давление p_{lcr} начала необратимого роста пузырька с радиусом R_0 определяется из условия: $p_{lcr} \leq 2\sigma/R_0 - p_{sat}(T_{l0})$, где σ - поверхностное натяжение [1-4,6,12]. Из этого условия следует, что при $T_l = 20^\circ\text{C}$ для активации пузырьков с $R_0 \leq 15 \mu\text{м}$ давление должно перейти в область отрицательных значений (стать «растягивающим») [1,3,4,12]. Применительно к данному эксперименту расчеты показывают, что в отсутствие в воде зародышей с $R_0 > 0,1 \mu\text{м}$ критическое давление в горловине с $D_{thr} = 4 \text{ см}$ должно было бы снизиться до значения $p_{lcr} \approx -8 \text{ атм}$, а в горловине с диаметром $D_{thr} = 1 \text{ см}$ - до -20 атм .

На рис.3-а,б видно, что из-за быстрого расширения активированных пузырьков давление p_{lcr} успевает снизиться до существенно меньших отрицательных значений ($p_{lcr} \propto -0,2 \div -0,5 \text{ атм}$). За короткое время $\Delta\tau \propto 30-40 \text{ мкс}$ давление возрастает до значения $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0})$ тем быстрее, чем крупнее пузырьки (рис.3-б). Это препятствует активации пузырьков меньшего размера [3,4].

В течении этого периода происходит резкое увеличение и плавное снижение скорости роста пузырьков (рис.3-в). Конкуренция между скоростью сброса внешнего давления ($p_{cl} = f(\tau)$) и скоростью нарастания давления ($p_{cl} = f(\tau)$) определяет число активированных пузырьков и эффективность дегазации. Очевидно, что по мере стабильной рециркуляции жидкости через кавитатор будут удаляться газовые пузырьки все меньшего размера, но с высокой концентрацией.

Рис.3. Характер изменения давления в жидкости внутри кластера $p_{cl} = f(\tau)$ (а, б) и скорости роста радиуса пузырьков $dR/d\tau = f(\tau)$ (в) на начальном этапе развития пузырькового ансамбля в зависимости от режимных параметров: D_{thr} , R_0 и N_b .

Представленные на рис.3 результаты доказывают существенное влияние начального размера пузырьков на скорость стабилизации давления в кластере до значения $p_{sat}(T_{l0})$ в стадии активации.

Рис. 4. Зависимость текущего паросодержания β от начального размера R_0 и от концентрации N_b газовых зародышей

Выводы. Интенсивность процесса кавитационной дегазации жидкости в значительной степени определяется совокупность сложных конкурирующих процессов, протекающих на стадии активации газовых микро-зародышей и начала кавитационного вскипания. Эти процессы обусловлены силовым взаимодействием растущих активированных пузырьков. Использование в данном исследовании математической модели, которая в отличие от других известных моделей учитывает силовое и термическое взаимодействие пузырьков, позволяет описать процессы происходящие на короткой стадии активации микро-зародышей и прогнозировать дальнейшее протекание процесса. Предлагаемая в данном исследовании методология предназначена для количественной оценки динамических, энергетических и термических характеристик кавитационного кластера, и может рассматриваться как начальный этап при разработке эффективных кавитационных устройств для эффективной дегазации жидкостей.

References

1. Yefremova, K.D., Pilgunov V.N. (2016). Cavitation properties of liquids. Science and Education of Bauman MSTU (electron. journ.). 03. 12–36. DOI: 10.7463/0316.0835344.
2. Franc, J.-P. (2006). Physics and Control of Cavitation - In Design and Analysis of High Speed Pumps (pp. 2-1 – 2-36). Educational Notes RTO-EN-AVT-143, 2, 1–36.
3. Dolinskiy, A.A., Ivanitskiy, G.K. (2008). Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid dispersed media. Kiev: Naukova dumka, 381.
4. Ivanitsky, G.K. (2017). Numerical study of bubble cluster behavior in hydrodynamic cavitation processes. Scientific Works, Odessa Nation.Academ. Food Technol., 81(1), 114–120.
5. Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharanand, V.K., Pandit, A.B. (2016). Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry //Rev. in Chem. Engng.–1, 1–36. DOI: 10.1515/revce-2016-0032.
6. Brennen, Ch. E. (1995). Cavitation and Bubble Dynamics.–N.-Y., Oxford University Press, 294
7. Iben, U, Makhnov, A., Schmidt, A. (2018) Numerical Investigation of Cavitating Flows with Liquid Degassing. Journal of Physics: Conf. Series 1038 012128. DOI:10.1088/1742-6596/1038/1/012128.
8. Kowalski, K., Pollak, St., Hussong, J. (2017). Experimental investigation of cavitation induced air release. EPJ Web of Conferences **143**, 02054 1–5. DOI: 10.1051/epjconf/201714302054.
9. Rooze, J., Andre, M., van der Gulik G.-J. S., Fernandez-Rivas, D., Gardeniers, J.G.E., Rebrov, E.V., Schouten, J C., Keurentjes, J.T.F.(2011). Hydrodynamic cavitation in micro- channels with channel sizes of 100 and 750 micrometers, Microfluidics Nanofluidics. 12(1–4), 499–508
10. Washio, S., Takahashi, S., Kamiyama, K., Banjyoya, K., Kikui, Sh. (2006). On-line deaeration of liquid utilizing a maximum developed stationary cavity in cavitation. Transactions of the Jap. Soc.of Mech. Engineers, Part B, 72(1). 2710–2716.
11. Antonio Montalvao, William Williams, Henrique Pareja (2003) Cavitation method and apparatus for deaeration.– U.S. Pat. No. 4,743,405. Jun. 19, 2003.
12. Ivanitsky, G., Nedbaylo, A., Konyk, A., Tselen, B.Ya., Gozhenko, L. (2018) Modeling cavitation reactors: a unified approach. Proc. XVII Int. Conf. on Improving processes and equipment of food and chemical industries. ICPA. Sept. 3-8. Odessa. ONAFT. 84–89.

Отримано в редакцію 03.05.2019
Прийнято до друку 22.06.2019

Received 03.05.2019
Approved 22.06.2019