

УДК 614.841

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Хафизов И.Ф., Мухин И.А.<sup>1</sup>, Доронин Д.Б.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа  
e-mail: <sup>1</sup>ilya.muhin@gmail.com*

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы определения режима работы кавитационно-вихревого аппарата с применением современных пакетов численного моделирования. Численно подтверждено наличие зоны гидродинамической кавитации на рассекателе смесителя.*

***Ключевые слова:** кавитация, Ansys, моделирование, жидкость, смешение*

Звуковые колебания, или волновые процессы, как отмечают авторы [1, 2], воздействуют на химико-технологические процессы через так называемые эффекты первого (частота, интенсивность и скорость акустических колебаний) и эффекты второго порядков, т.е. нелинейные эффекты, развивающиеся в жидкости при распространении мощных акустических волн. К эффектам второго порядка относятся кавитация (разрыв сплошности жидкости), волновые течения (звуковой ветер), пульсация газовых пузырьков и др.

Кавитация – образование в жидкости пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром, газом или их смесью. В процессе истечения жидкости с резким падением давления в среде возникают кавитационные пузырьки, которые резко захлопываются после перехода в область повышенного давления, порождая сильные гидродинамические возмущения в жидкости, интенсивное излучение акустических волн [1]. В результате развития в среде кавитационного процесса возникает сложная гидродинамическая обстановка, влияющая на структуру жидкости:

1. Осциллирующие пузырьки – образуют волны давления  $P$  в среде.
2. Захлопывающиеся области образуют ударные волны.

При захлопывании пузырька возникают [3] сильные возмущения прилегающих слоёв жидкости, распространяющиеся в виде звуковых волн конечной амплитуды, а при достаточно резком захлопывании – даже в виде слабых ударных волн. Это явление получило название акустического эффекта кавитации. Энергия излучаемой волны  $W$  растёт с увеличением скорости захлопывания  $u$  и выражается через энергию  $E$  пульсации полости формулой:

$$W = 2Eu/c,$$

где  $c$  – скорость звука в жидкости.

Максимальное давление в волне сжатия на расстоянии  $r$  от пузырька равно:  $p = P_{max} R_{min}/r$ , а характерная длительность импульса сжатия:  $z \sim R_{min}/u$  (рис. 1)

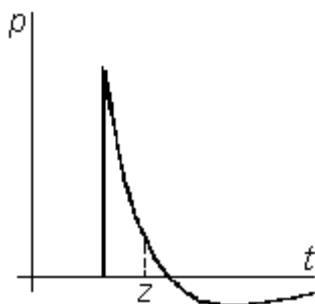


Рис. 1. Форма импульса давления, излучаемого при захлопывании пузырька.

3. Турбулентные потоки при перемещении массы жидкости во время технологического процесса.

Кавитационное течение характеризуют безразмерным параметром (числом кавитации):

$$X = \frac{2(P - P_s)}{\rho V^2},$$

где  $P$  – гидростатическое давление набегающего потока, Па;

$P_s$  – давление насыщенных паров жидкости при определенной температуре окружающей среды, Па;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – скорость потока на входе в систему, м/с.

Известно, что кавитация возникает при достижении потоком граничной скорости, когда давление в потоке становится равным давлению парообразования (насыщенных паров). Этой скорости соответствует граничное значение критерия кавитации.

Накладываясь друг на друга, на пузырьки газа и твердые частицы, присутствующие в среде, эти факторы в объеме образуют неоднородность давлений  $P$ , что порождает быстрые микропотоки и общие течения.

Одна из характерных особенностей кавитации состоит в том, что она является весьма своеобразным и эффективным механизмом локального концентрирования относительно невысокой средней энергии волновых воздействий в очень малых объемах, что приводит к созданию исключительно высоких плотностей энергии.

В настоящее время усовершенствование конструкции массообменных аппаратов в основном направлено на интенсификацию контакта между фазами. Это достигается за счет увеличения площади контакта или создания циркуляционных (перемешивающих) устройств в зоне реакции.

В данной работе авторы рассматривают возможность применения волновых воздействий для интенсификации процессов нефтехимической технологии.

В качестве инструмента исследования был выбран пакет для имитационного моделирования ANSYS, позволяющий численно решать уравнения гидродинамики.

С помощью указанного программного комплекса решалась задача моделирования взаимодействия потоков жидкости внутри центробежно-струйной форсунки с тангенциальным вводом периферийного потока.

Целью данной работы было численно подтвердить наличие области кавитации и оценить качество смешения путём анализа массовой доли продукта.

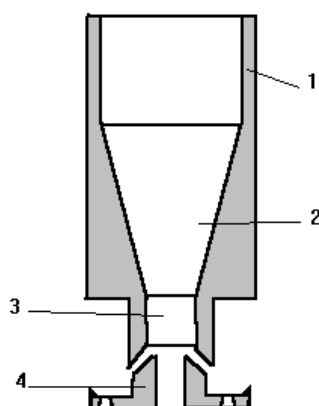


Рис. 2. Сопло подачи жидкости в камеру смешения:

- 1 – подводящий патрубок; 2 – конфузор;
- 3 – рабочая часть; 4 – кольцевой рассекатель

### 1. Построение 3D-модели расчетной области

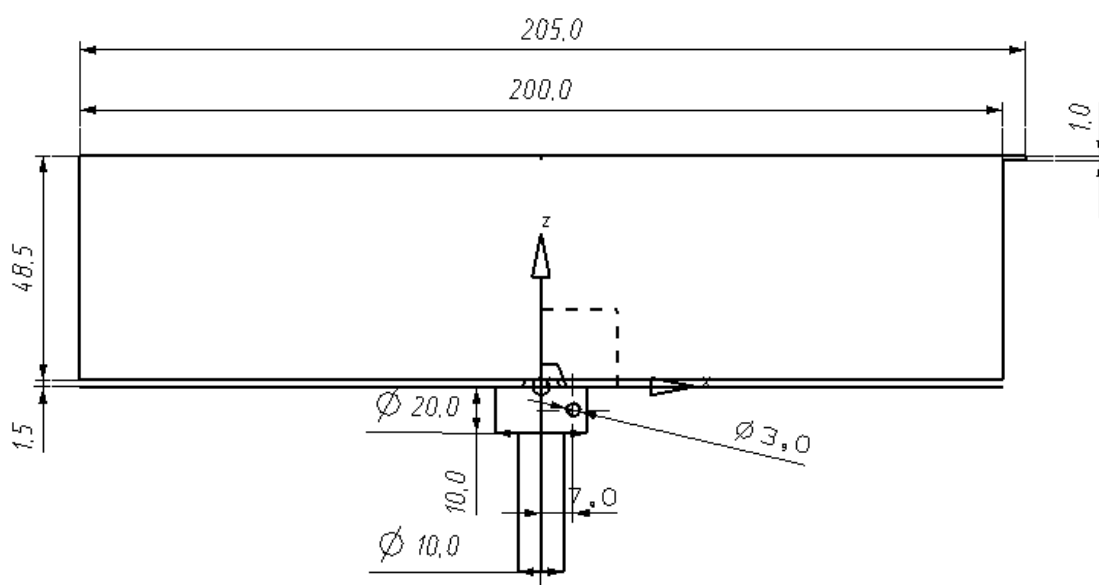


Рис. 3. Виды расчетной области с проставленными размерами

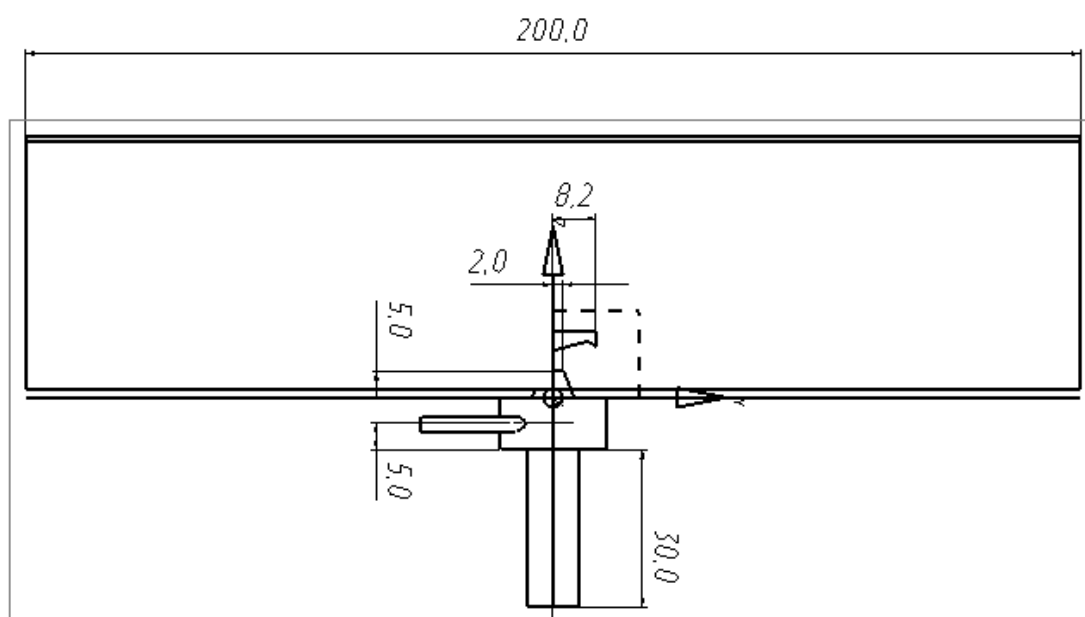


Рис. 4. Виды расчетной области с проставленными размерами

## 2. Построение расчетной сетки

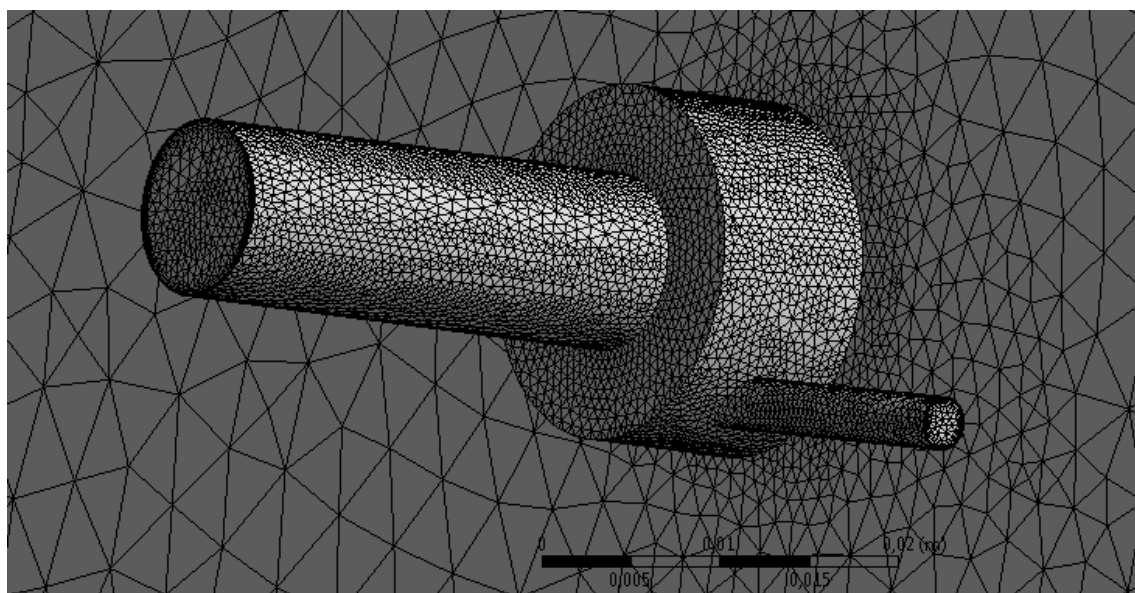


Рис. 5. Сеточная модель расчетной области – укрупнённый вид

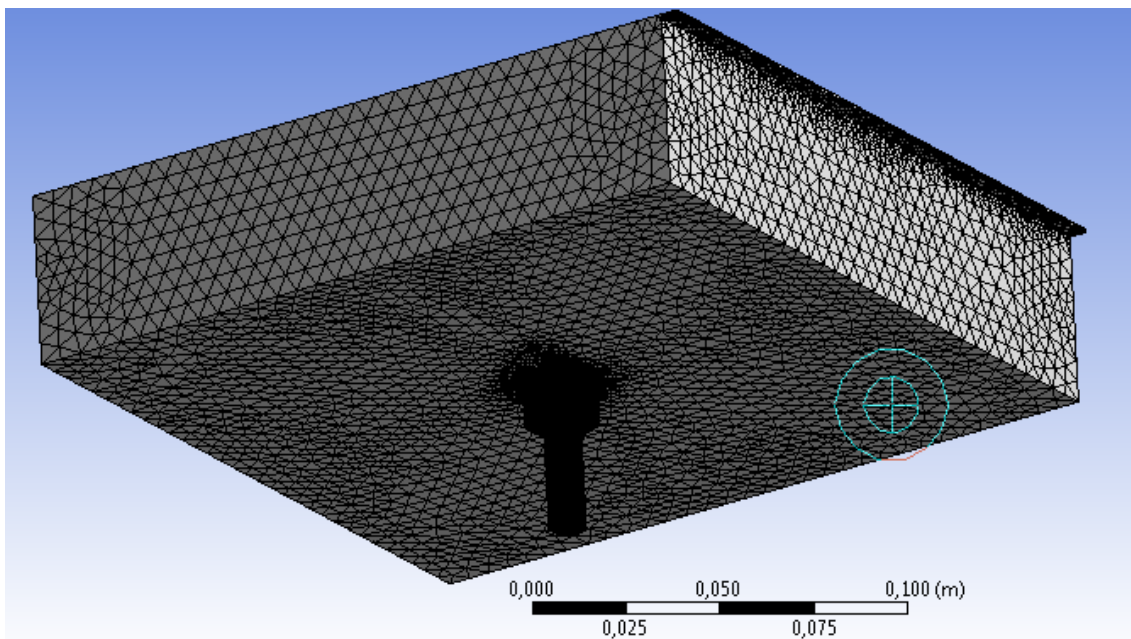


Рис. 6. Сеточная модель расчетной области – общий вид

### 3. Задание моделей течения, свойств материалов, граничных и начальных условий

На рис. 7 представлена расчетная область с расставленными граничными условиями, на всех остальных неуказанных поверхностях поставлено условие стенки с прилипанием.

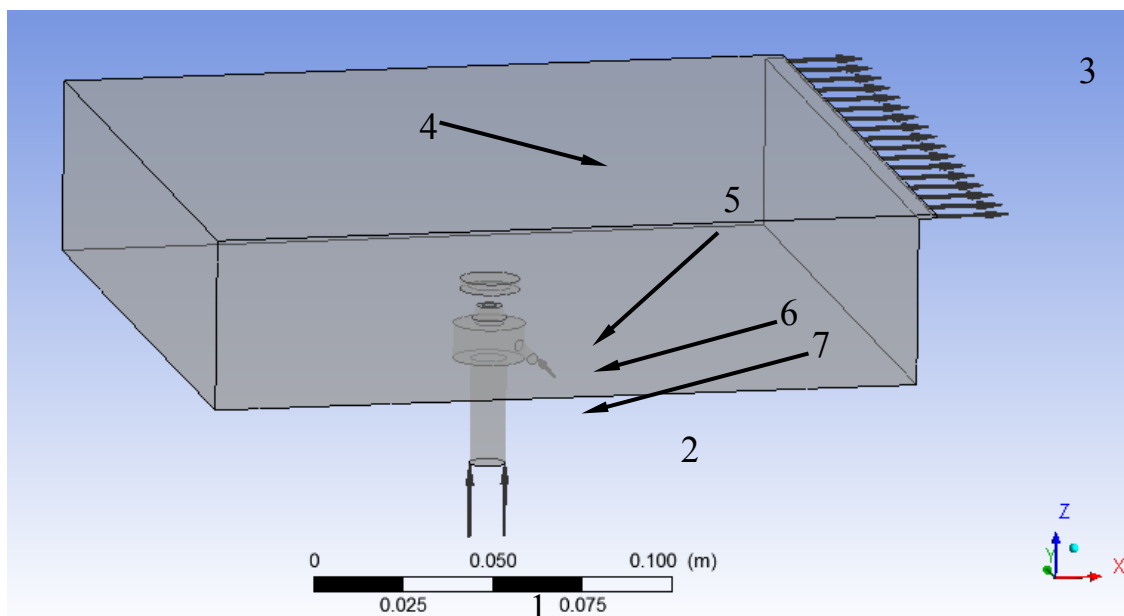


Рис. 7. Модель расчетной области с расставленными граничными условиями:

- 1 – вход продукта; 2 – вход реагента; 3 – свободный выход;  
4 – стенка с проскальзыванием; 5 – дефлектор; 6 – сопло; 7 – камера смешения

*Параметры задачи:*

Количество расчетных ячеек составило 553525.

Модель турбулентности – k-ε.

Опорное давление – 0 Па.

Течение рассчитывалось с учетом действия силы тяжести: вектор ускорения свободного падения направлен против оси Z ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ).

В задаче использовалась модель двухфазного течения: жидкая фаза – продукт и реагент в жидком состоянии; газообразная фаза – продукт и реагент в виде однородного пара. Реагент, продукт и смесь паров непрерывно распределены по всему объему и их массовые доли связаны соотношением

$$m_{reagent} + m_{product} + m_{vapour} = 1 .$$

В задаче учитывались: турбулентный характер течения; конвективный теплообмен; кавитационный массоперенос.

Давление, при котором жидкая фаза переходит в газообразную: 2 000 Па.

Вход продукта: массовый расход продукта 1,11 кг/с; температура 130 °С.

Вход реагента: массовый расход реагента 0,0022 кг/с; температура 25 °С

Выход: избыточное давление 20 000 Па.

#### 4. Визуализация и анализ результатов расчета

Рис. 8 иллюстрирует распределение давлений в продольной плоскости камеры смешения. Красная область – избыточное давление выше 2 000 Па, синяя область – избыточное давление ниже 1 000 Па. Выбор такой шкалы обусловлен тем, что необходимо выявить зону возникновения кавитации.

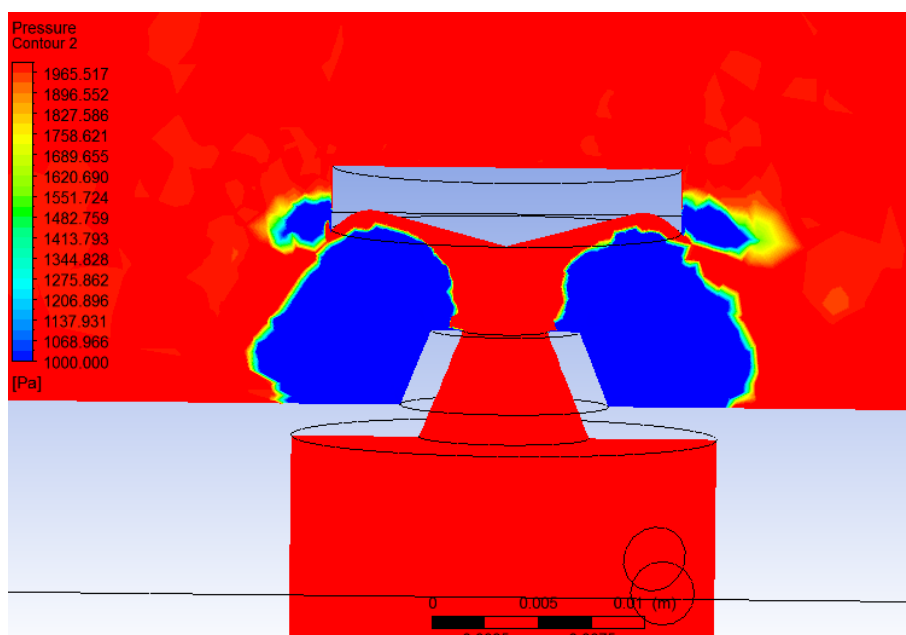


Рис. 8. Распределение статического давления в продольной плоскости камеры смешения

На рис. 9 показано векторное поле абсолютной скорости жидкой фазы. Из сопоставления рис. 8 и 9 видно, что кавитация возникает в зоне интенсивного вихреобразования вокруг дефлектора.

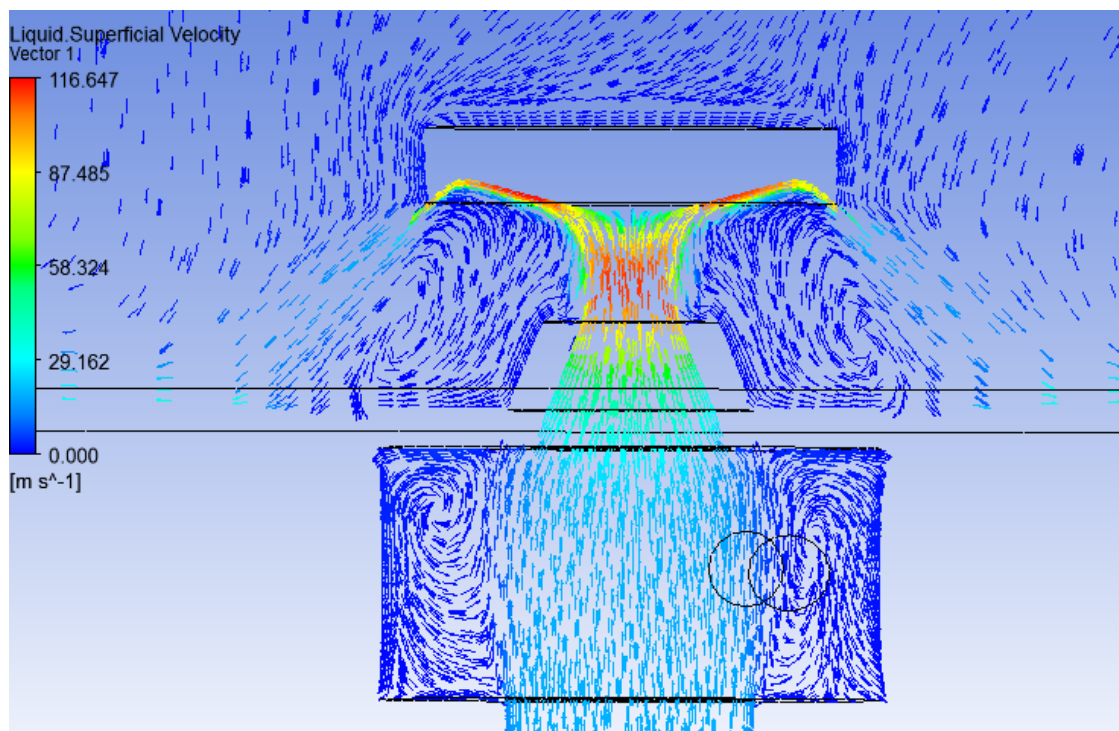


Рис. 9. Векторное поле скоростей жидкой фазы в продольной плоскости камеры смешения

Критерием высокой степени смешения продукта и реагента является отсутствие в расчетной области высоких массовых долей продукта. Условно зададимся значением массовых долей продукта от 0,3 до 1. На рис. 10 приведено распределение продукта по расчетной области, где его массовая доля превышает 0,3. Из рис. 10 видно, что за зоной кавитации массовая доля продукта не превышает 0,3, следовательно, продукт и реагент достаточно равномерно распределены по расчетной области.

Рис. 10 иллюстрирует распределение паров продукта и реагента по расчетной области. Как видно из рис. 11, кавитация происходит только вблизи дефлектора.

Исходя из полученных результатов возможно сделать вывод о существовании области кавитации после прохождения продуктом рассекателя. Данный способ обработки является перспективным и легко реализуемым на практике.

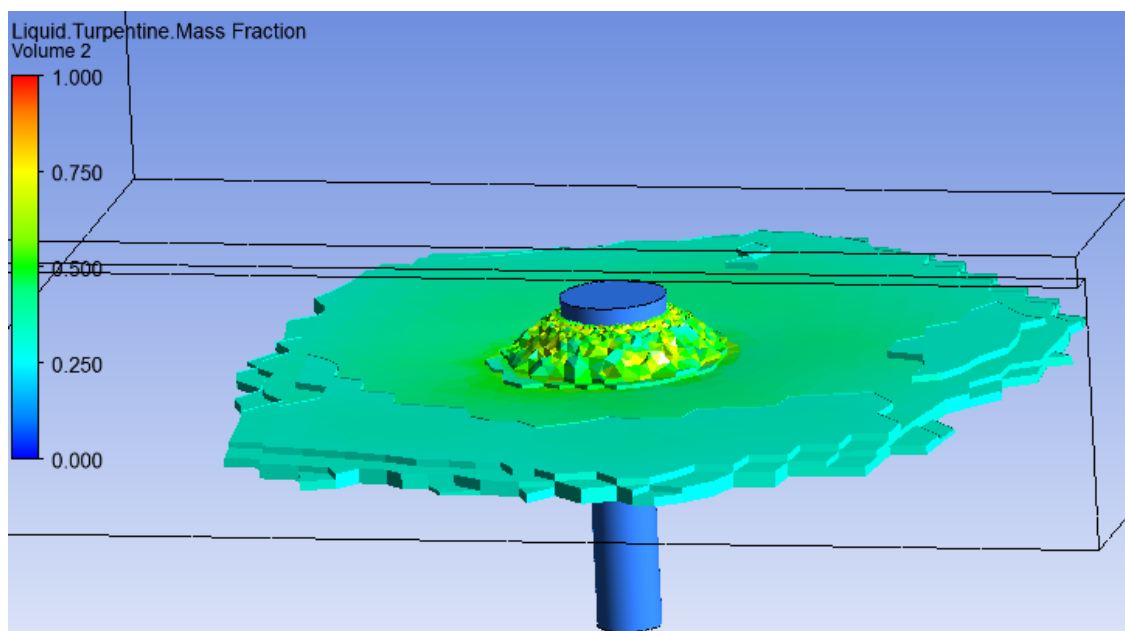


Рис. 10. Распределение продукта с массовой долей выше 0,3

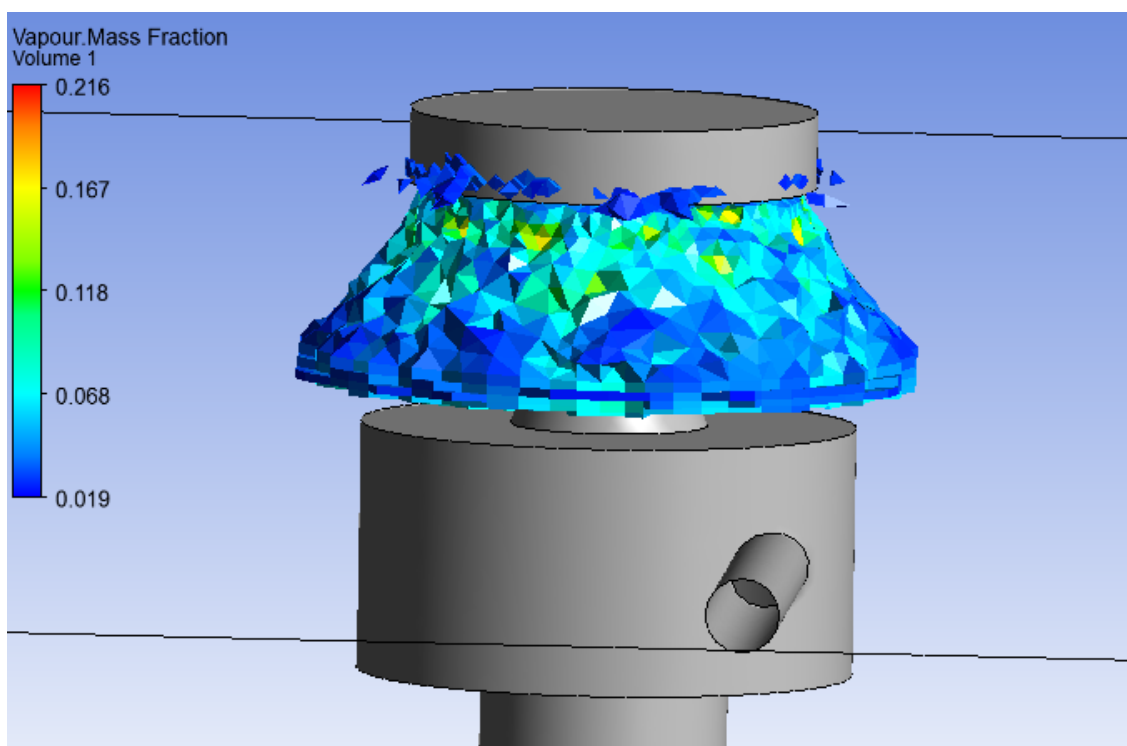


Рис. 11. Распределение паров продукта и реагента



### Литература

1. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. С. 41.
2. Хафизов Н.Ф. Разработка конструкций аппаратов для процесса абсорбционной очистки газов и регенерации поглотительных растворов: дисс. к.т.н. Уфа, УГНТУ, 2002. 129 с.
3. Фридман В.М. Физико-химическое действие ультразвука на гетерогенные процессы жидкостной обработки материалов. Применение ультразвука в химико-технологических процессах, Москва, ЦИНТИ электротехнической промышленности и приборостроения, 1960. С. 107 - 118.
4. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. Т.1. 385 с.; Т.2. 337 с.
5. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 253 с.
6. Белов И.А. Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2001. 108 с.
7. Ваграфтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

## SIMULATION OF MIXER FOR STUDY OF WAVE PROCESSES

I.F. Khafizov, I.A. Muhin, D.B. Doronin

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*

*e-mail: <sup>1</sup>ilya.muhin@gmail.com*

**Abstract.** *This paper deals with the operation mode determination for cavitation vortex apparatus using advanced numerical modeling packages. Numerically confirmed the presence of zones of hydrodynamic cavitation on chopper mixer.*

**Keywords:** *cavitation, ANSYS, modeling, fluid mixing*

### References

1. Novitskii B.G. *Primenenie akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh* (Application of acoustic vibrations in chemical processes). Moscow, Khimiya, 1983. P. 41.
2. Khafizov N.F. *Razrabotka konstruktsii apparatov dlya protsessa absorbtionnoi ochistki gazov i regeneratsii poglotitel'nykh rastvorov* (Design of apparatuses for the of absorbing process for gas purification and regeneration of the absorbing solutions). PhD thesis. Ufa, UGNTU, 2002. 129 p.
3. Fridman V.M. *Fiziko-khimicheskoe deistvie ul'trazvuka na geterogennye protsessy zhidkostnoi obrabotki materialov* (Physico-chemical effects of ultrasound on heterogeneous processes of liquid treatment of metal). In *Primenenie ul'trazvuka v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh* (Ultrasound application in chemical engineering). Moscow, 1960. PP. 107 - 118.
4. Anderson D., Tannehill Dzh., Pletcher R. *Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen*. Moscow, Mir, 1990. Vol. 1. 385 p.; Vol. 2. 337 p. (Transl. from Dale A. Anderson, John C. Tannehill, Richard H. Pletcher. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. Hemisphere Pub. Corp., 1984. 599 p.)
5. Belov I.A., Isaev S.A., Korobkov V.A. *Zadachi i metody rascheta otryvnykh techenii neszhimaemoi zhidkosti* (The problems and methods of analysis of separation flows of incompressible liquid). Leningrad, Sudostroenie, 1989. 253 p.
6. Belov I.A., Isaev S.A. *Modelirovanie turbulentnykh techenii: uchebnoe posobie* (Simulation of turbulent flows). SPb., BalGTU, 2001. 108 p.
7. Vagraftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* (The handbook of thermodynamic properties of gases and liquids). Moscow, Nauka, 1972. 720 p.