

РАСЧЁТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В РЕЗЕРВУАРАХ

Галиакбаров В.Ф., Салихова Ю.Р.

1. Введение

Основной отличительной особенностью технологических процессов нефтехимии и нефтепереработки является использование и обработка больших объемов жидких сред. Целью большинства из них является проведение массообменных процессов. В частности, для приготовления нефтепродуктов (бензинов, масел, мазута, и др.) из исходных компонентов путем их перемешивания с целью усреднения характеристик; для предотвращения расслаивания и образования осадков при хранении нефти и нефтепродуктов в резервуарах; для передачи и распределения тепла при хранении продуктов при высокой (около 200 °С) температуре в резервуарах.

В настоящее время часто с целью смешения нефтепродуктов в резервуарах большого объёма осуществляют циркуляцию его содержимого с местным образованием турбулентного течения. Метод заключается в том, что центробежный насос забирает перемешиваемый продукт с нижней части резервуара и сильной струёй возвращает его под уровень жидкости в ту же ёмкость с противоположной стороны последней.

При перемешивании светлых нефтепродуктов этот традиционный метод обеспечивает достаточно хорошее перемешивание. Тщательность перемешивания контролируется взятием проб с различных высот аппарата. Однако данный метод связан с большим расходом энергии и времени. Ибо, как показывает опыт, в среднем требуется перекачать по схеме резервуар – насос – резервуар несколько его объёмов. Для большей эффективности обычно выходное отверстие напорной трубы снабжают соплом. В литературе также описаны некоторые другие модификации традиционного метода, но не всегда они полностью удовлетворяют потребностям производства, поэтому по-прежнему актуальной остаётся задача разработки новых способов перемешивания и новых конструкций соответствующих устройств.

В этой связи представляет интерес расчёт потока для разных режимов или способов реализации процесса с целью получения достаточно полной картины происходящего и выявления направления исследований, ориентированных на повышение эффективности процесса.

2. Математическая формулировка задачи.

Мы приведём расчёт гидродинамических характеристик турбулентного течения, вызванного циркуляцией бензиновых фракций в вертикально – цилиндрическом резервуаре. Математическое описание турбулентного движения основывается на уравнениях неразрывности и Навье – Стокса, в которые подставляется истинная скорость, выражаемая как сумма средней по времени и пульсационной составляющих. Эти уравнения могут быть записаны в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned}
 \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) &= f_1 - \frac{\partial p}{\partial x} + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 \rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) &= f_2 - \frac{\partial p}{\partial y} + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
 \rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) &= f_3 - \frac{\partial p}{\partial z} + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь неизвестные функции $u(x,y,z)$; $v(x,y,z)$; $w(x,y,z)$ - составляющие поля осреднённой скорости $\mathbf{U}(x, y, z)$; $p(x,y,z)$ – поле давления в стационарном потоке. Источники внешних сил в системе отсутствуют: $f_i=0$. Известные параметры: ρ - плотность жидкости и μ – коэффициент динамической вязкости постоянные свойства жидкости; μ_T – коэффициент турбулентной вязкости является характеристикой потока. Он не постоянен во всех частях объёма жидкости, а изменяется в соответствии с колебаниями градиента скорости от нуля у стенок до относительно больших значений в центре потока. Оценка коэффициента турбулентной вязкости основывается на моделях турбулентности.

Дифференциальные уравнения (1) должны быть дополнены условиями равенства нулю скорости на твёрдых границах и расхода жидкости.

К сожалению, только что поставленная краевая задача оказывается очень трудной. Неизвестно ни одного частного аналитического решения такой задачи.

3. Конечно-элементное решение задачи средствами ANSYS/FLOTRAN

В данной работе приводятся результаты численных расчётов полной трёхмерной задачи, полученные с помощью конечно-элементного программного комплекса ANSYS. Рассмотрим методику численного решения задачи с использованием модуля FLOTRAN пакета ANSYS [2], [3], [4], [5], [8].

Проведение конечно-элементного расчета с помощью блока FLOTRAN пакета ANSYS состоит в прохождении следующих шагов: описание расчетной области (геометрической модели); создание конечно-элементной (сеточной) модели; задание физико-механических параметров потока (вязкость жидкости, ее плотность и т.п.); выбор типа расчета (стационарное турбулентное течение); выбор метода решения и расчетных параметров (количество итераций, условия сходимости); решение; исследование результатов с помощью постпроцессора.

Основные уравнения ANSYS/FLOTRAN для случая вязкой несжимаемой жидкости:

1. Уравнение непрерывности.

Уравнение непрерывности вытекает из закона сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{v} = 0 \tag{2}$$

где ρ - плотность, \mathbf{v} – вектор скорости, t – время.

Скорость изменения плотности заменяется на скорость изменения давления и на скорость изменения плотности по давлению:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \tag{3}$$

где P – давление.

Для несжимаемой среды имеет место следующее определение:

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

По умолчанию в значение β полагается равным 10^{15} , оно характеризует несжимаемую среду.

2. Уравнения движения.

Из закона сохранения масс для ньютоновой жидкости вытекает следующая зависимость между тензором напряжений и скоростью деформации среды:

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij}\lambda \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

где τ_{ij} – тензор напряжений;

u_i – компоненты вектора скорости ($u_1=v_x, u_2=v_y, u_3=v_z$);

μ – динамическая вязкость;

λ – второй коэффициент вязкости.

Последний член в случае несжимаемой жидкости равен нулю.

Выражение (5) преобразует уравнения движения в уравнения Навье - Стокса:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}(\nabla \mathbf{v}) = -\frac{1}{\rho} \text{grad}P + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu_e \nabla \mathbf{v}) \quad (6)$$

где \mathbf{v} – поле скорости;

P – давление;

μ_e – эффективная вязкость, для ламинарной жидкости совпадает с динамической вязкостью, для турбулентного случая задается формулами в зависимости от модели турбулентности.

3. Уравнение энергии

Для несжимаемой жидкости уравнение энергии в ANSYS/FLOTRAN формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p T \mathbf{v}) = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q_v \quad (7)$$

где C_p – коэффициент теплоёмкости,

T – температура;

K – коэффициент теплопроводности;

Q_v – мощность объёмного источника тепла.

4. Модели турбулентности.

В ANSYS/FLOTRAN предусмотрены шесть моделей для расчёта коэффициента турбулентной вязкости. Самая простая модель – Zero Equation Model (ZEM), где μ_t считается следующим образом:

$$\mu_t = \rho L_s^2 \sqrt{\Phi}$$

где Φ – тензор вязкой диссипации,

$$L_s = \begin{cases} L_x & \text{если } L_x > 0 \\ \min \left\{ \begin{matrix} 0.4L_n \\ 0.09L_c \end{matrix} \right\} & \text{если } L_x \leq 0 \end{cases}$$

L_x – масштаб длины,

L_n – кратчайшее расстояние от узла до ближайшей границы,

L_c – характеристический масштаб длины, обычно максимальное значение L_n .

В остальных моделях μ_t вычисляется как функция параметров турбулентности – кинетической энергии и скорости ее диссипации:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где k – турбулентная кинетическая энергия,

ε – турбулентная энергия диссипации.

В стандартной k-ε модели и в модели RNG (Re-normalized Group Model) C_μ – константа, в остальных задается формулами. Для нахождения k и ε требуется решить два дополнительных уравнения – уравнение турбулентной кинетической энергии и уравнение скорости диссипации. Для стандартной k-ε модели они имеют следующий вид:

уравнение турбулентной кинетической энергии:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho k \nabla \cdot v = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_t} (g \cdot \nabla T),$$

уравнение скорости диссипации:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \varepsilon \nabla \cdot v = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu (1 - C_3) \beta \rho k}{\sigma_t} (g \cdot \nabla T).$$

$C_1, C_{1\varepsilon}, C_2, C_3, C_4, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_t, \beta$ – коэффициенты, значения которых заданы по умолчанию.

Уравнения (2)-(3) с учетом $\beta=10^{15}$ сводятся к уравнению неразрывности в (1). Уравнения движения (5), (6) для стационарного потока

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

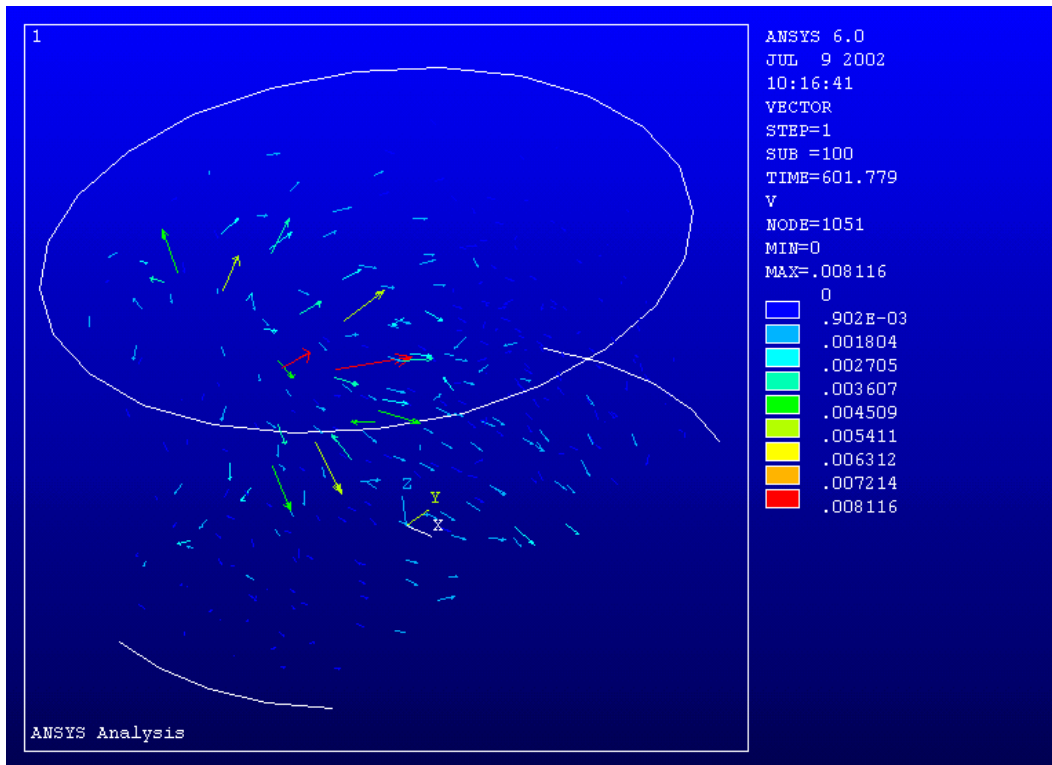
есть уравнения (1). Для расчёта турбулентной вязкости была использована стандартная k-ε модель, используемая по умолчанию. А выражение (7) если не требуется температура, не используется. Таким образом, используя модуль ANSYS/FLOTRAN, можно моделировать гидродинамическую задачу (1).

4. Результаты расчёта для традиционного метода циркуляционного перемешивания

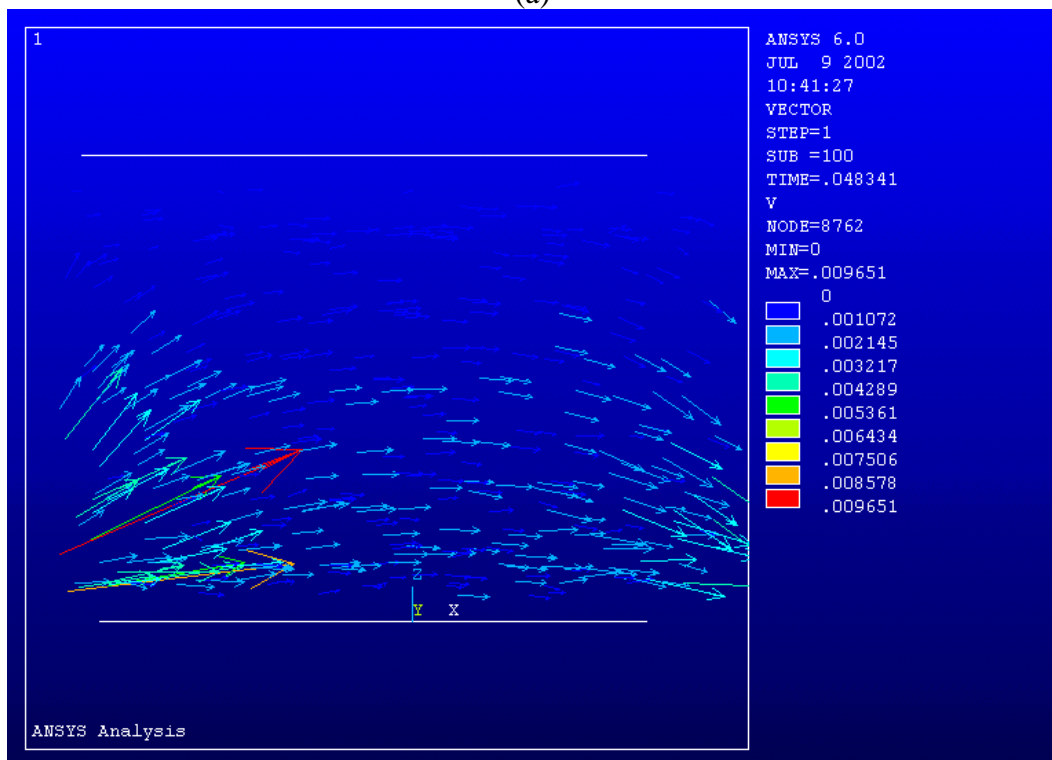
Расчёт гидродинамических характеристик потока проводился для двух известных способов реализации процесса. В первом для ввода струи жидкости в резервуар используется нагнетательная труба, во втором для улучшения характеристик процесса выходное отверстие трубы снабжается соплом. В обоих случаях получилось ожидаемое поведение потока. Полученные результаты представлены в виде рисунков. На рис.1 (а, б) представлено поле осреднённых скоростей в объёме резервуара для обоих случаев. На рис. 2 (а, б) показаны линии тока.

Линии тока, возникающие при перемешивании с помощью сопла аналогичны тем, которые получены для простейшего способа перемешивания, когда используется лишь труба без насадка. В обоих случаях отсутствует перемешивание траекторий. Течение протекает однонаправлено. Расчёт поля скоростей показал, что и в том и в другом случае при начальной скорости струи 3 – 5 м/с скорость жидкости в объёме резервуара варьируется в пределах 10^{-4} – 10^{-3} м/с. (Области, соответствующие начальному и конечному участку струи, где скорость потока совпадает с начальной пришлось исключить из рассмотрения, чтобы иметь

возможность наблюдать картину распределения осреднённых скоростей во всем резервуаре).



(a)



(б)

Рис. 1. Распределение скоростей: а – в случае использования трубы без сопла; б – при использовании сопла

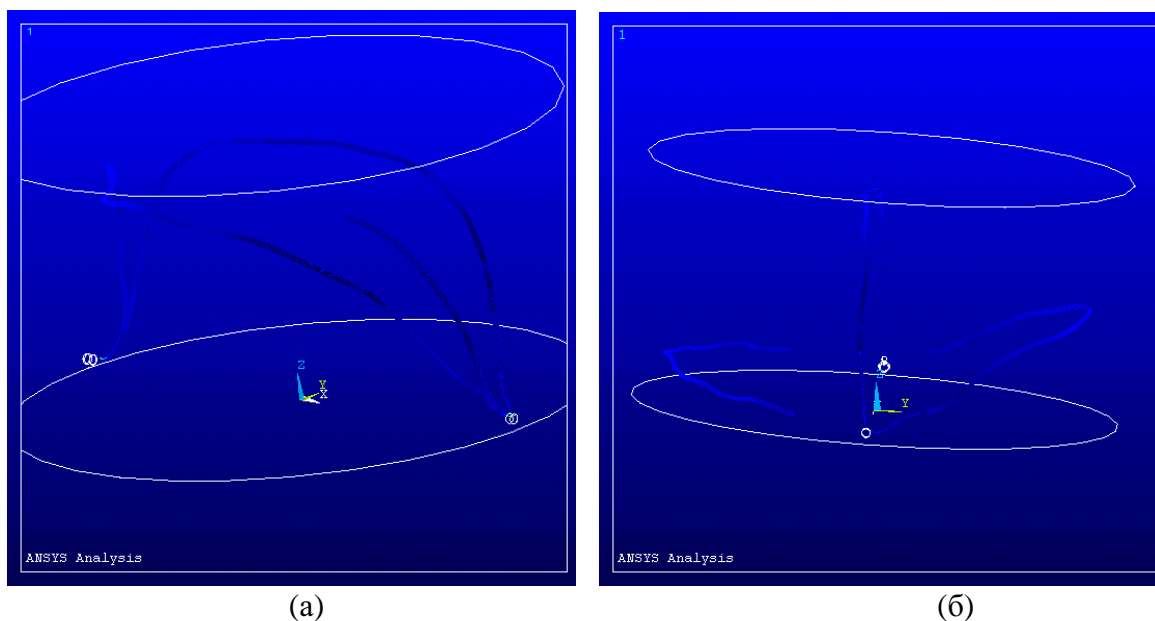


Рис. 2 Линии тока: а – в случае использования трубы без сопла; б – при использовании сопла

Использование сопла позволяет повысить начальную турбулентность струи, но как было доказано [6], использование кинетической энергии струи, которая проявляется в подсасывании жидкости из окружающей среды, будет эффективным на расстоянии, не превышающем 15-20 диаметров сопла. На большем удалении поток сопла обладает ещё, конечно, способностью подсасывать жидкость, и это расстояние в зависимости от начальной скорости потока колеблется в пределах от 80 до 100 диаметров сопла, но при перемешивании в резервуаре большого объёма использование сопла не позволяет сделать процесс перемешивания эффективным. По-прежнему для достижения необходимой степени перемешивания потребуется прокачать несколько объёмов резервуара. Чтобы сделать перемешивание более эффективным, необходимо добиться качественного изменения характера течения жидкости в резервуаре. Эту задачу позволяет решить использование вместо сопла нового эжектирующего устройства для перемешивания [7].

5. Результаты расчёта для циркуляционного перемешивания с использованием эжектирующего устройства [7]

Конструкция устройства приведена на рис. 3. Жидкость из резервуара подсасывается насосом. Напорная труба насоса введена в трубопровод, снабжённый смесителем, в котором через сопло 1 жидкость поступает в диффузор 2, который соединён с корпусом смесителя с помощью планок 3. На внутренней поверхности сопла выполнены выступы в виде радиальных колец, которые обеспечивают регулируемую в пределах $0.01 \div 0.35$ начальную турбулентность потока. Жидкость, поступающая из сопла, подсасывает жидкость из среды, окружающей смеситель, образуя в его окрестности локальное вихревое течение.

Результаты расчёта потока с помощью ANSYS/FLOTRAN (рис. 4-5) показали, что использование эжектирующего устройства в корне изменяет характер течения. Наблюдается довольно запутанная картина линий тока, которая, свидетельствует об образовании выраженного смешанного течения во всём объёме резервуара, что обеспечивает наилучшее перемешивание (рис. 4). При такой же скорости струи на выходе сопла, в среднем скорость течения в резервуаре повышается. Она варьируется от 10^{-2} до 10^{-1} .

Промышленные испытания подтверждают эффективность перемешивания с использованием эжектирующего устройства. При традиционной технологии приготовления бензина (последовательная закачка от более тяжёлых компонентов к лёгким), которая не гарантировала получение однородной смеси, применение нового смесителя позволило получить стабильно однородную смесь и уменьшить время приготовления продукции в 2 раза.

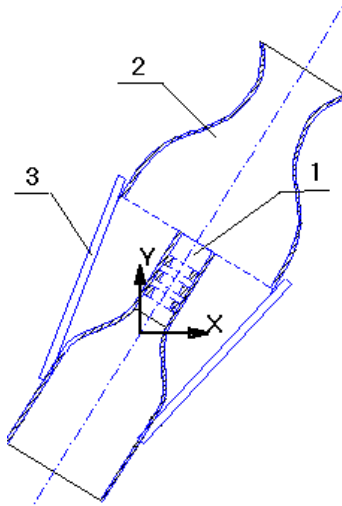


Рис. 3 Эжектирующее устройство для перемешивания

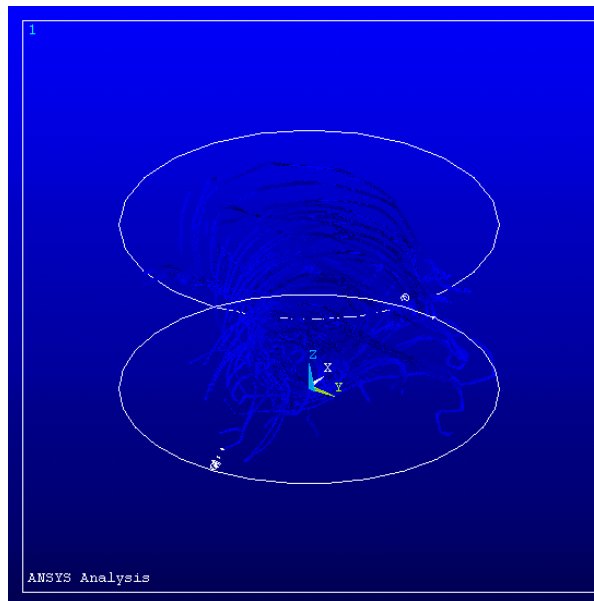


Рис. 4. Линии тока жидкости в резервуаре при использовании эжектирующего устройства

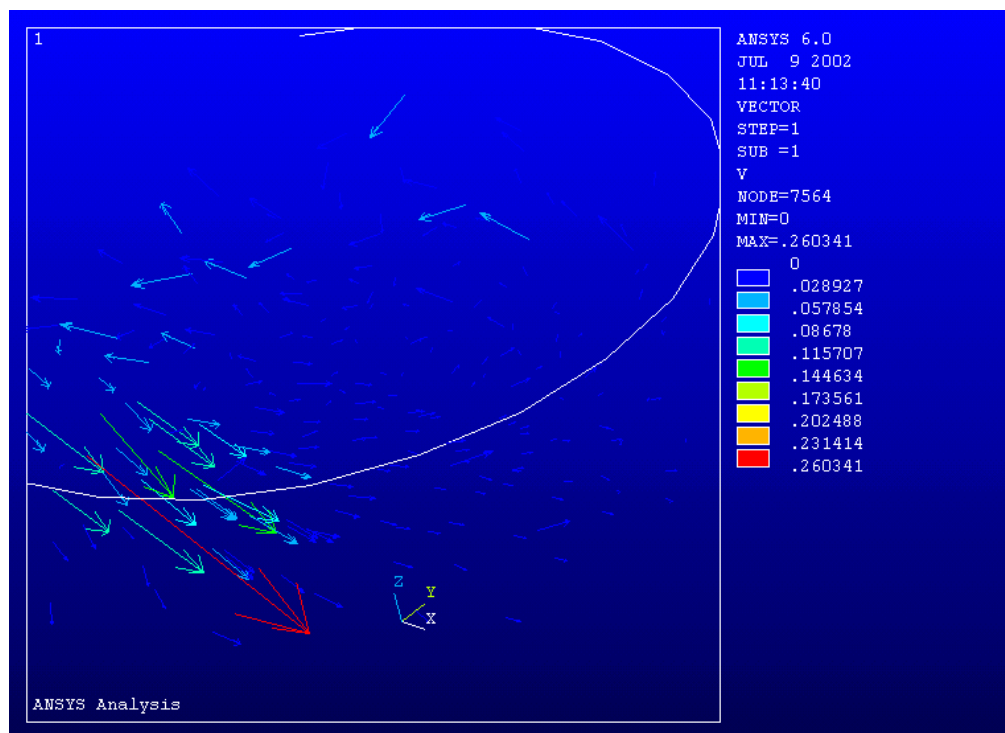


Рис. 5. Поле скоростей жидкости в резервуаре при использовании эжектирующего устройства

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Б. Коган Теоретические основы типовых процессов химической технологии. Л., Изд-во Химия, 1977.
2. ANSYS. Basic Analysis Procedures Guide. Rel.5.7 Ed. P.Koehnke /ANSYS Inc. Houston, 2001г.
3. ANSYS. Commands Reference.Rel.5.7 Ed. P.Koehnke /ANSYS Inc. Houston, 2001г.
4. ANSYS. Theory Reference. Rel.5.7. Ed. P.Koehnke / ANSYS Inc. Houston, 2001г.
5. ANSYS. Verification Manual. Rel. 5.7. Ed. P.Koehnke / ANSYS Inc. Houston, 2001г.
6. З. Штербачек, П. Тауск Перемешивание в химической промышленности. Л., Изд-во Химической литературы, 1963.
7. Патент РФ № 2189852 Устройство для перемешивания жидкостей в резервуарах / Галиакбаров В.Ф., Салихова Ю.Р., Галиакбаров М.Ф., Галиакбаров И.М. – М., 2002. – Бюл. № 27.
8. Ресурсы Интернет.