УДК 621.453.034.3:621.646.7

А.М. Грушенко, канд. техн. наук,
А.Л. Кирьянчук

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОЙ МОДЕЛИ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВИХРЕВОГО ТРАКТА С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ANSYS

Известно, что устройства на основе трактов с взаимно перекрещивающимися каналами существенно интенсифицируют процессы тепло- и массопереноса [1, 2]. Как показали экспериментальные исследования [3], они могут быть применены как смесительно-кавитирующие проточные тракты при решении ряда актуальных задач в энергомашиностроении.

С тоски зрения гидродинамических процессов характер течения жидкости в цилиндрических вихревых трактах (ЦВТ) определяется числом Re, характеризуется нестационарным начальным (входным) участком, который, как правило, составляют три пояса скрещивания [4], и стабилизированным участком течения. Очевидно, что и процессы массообмена в ЦВТ зависят от характера течения (чисел Re), они имеют также некий начальный участок, на котором происходят и полностью заканчиваются процессы смешения разнородных жидкостей. За ним следует стабилизированный участок смешения, на котором происходит перемешивание уже смешанных на начальном участке жидкостей. Очевидно, что с точки зрения решения практических задач стабилизированный участок смешения не представляет интереса. В общем случае начальный участок ЦВТ, определяющий протекание процессов смешения жидкостей, может не совпадать с начальным участком, характеризующим входные потери в ЦВТ, поэтому требуются специальные теоретические и экспериментальные исследования процессов смешения в ЦВТ.

Проведение экспериментальных исследований предусматривает применение плоской модели ЦВТ, проточная часть которой в целях обеспечения визуализации выполнена из прозрачного материала.

Для обоснования выбора геометрических характеристик проточной части модели были проведены теоретические исследования, целью которых было математическое моделирование процессов течения, что в свою очередь требует решения следующих вопросов:

– определение геометрической модели расчетной области и её имплантация в расчетную область математической модели;

– выбор алгоритма численных исследований;

– выбор модели турбулентности (характер течения в трактах - турбулентный);

– формулировка граничных условий.

Твердотельная модель одного из вариантов исследуемой области течения плоской модели ЦВТ показана на рис. 1.

Анализ проводился для различных углов скрещивания ψ – 30, 60, 90, 120 и 150 градусов при различных величинах перемычки (расстояния между каналами одной группы) Δ – 1; 2,5 и 5мм. Во всех случаях каналы имели полукруглую форму с эквивалентным диаметром 3,05 мм.

При анализе течения в различных схемах физической модели были приняты следующие основные характеристики и допущения:

С режим течения – установившийся;

– течение жидкости – стационарное, несжимаемое, турбулентное, адиабатическое, но не изотропное (силы вязкости учитываются);

– жидкая среда – вода (плотность ρ = 1000 кг/м^3, коэффициент динамической вязкости (при 20˚С) μ = 1003·10^{-6} кг/(м·с));

– массовыми силами пренебрегаем.

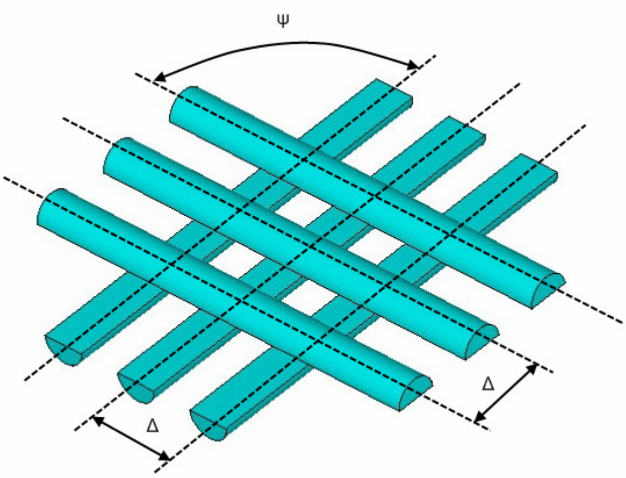

Рисунок 1 – Твердотельная модель исследуемой области течения (ψ = 90˚, Δ = 5 мм)

При анализе используется стандартная модель *k*-*ε* турбулентности – полуэмпирическая модель, применяемая при решении широкого спектра задач, связанных с течениями различных сред, основанная на модельных уравнениях переноса для кинетической энергии турбулентности *k* и скорости ее диссипации *ε*.

При использовании *k*-*ε*-модели турбулентности математическая модель течения среды имеет вид

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z}=0\,, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial V_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial V_x}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial V_x}{\partial z}\right), \qquad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial V_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial V_y}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial V_y}{\partial z}\right), \qquad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial V_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial V_z}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial V_z}{\partial z}\right), (5)$$

$$\frac{\partial(\rho V_x k)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_y k)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_z k)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_t\frac{\partial k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_t\frac{\partial k}{\partial z}\right)+\mu_t\Phi-\rho\varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho V_x \varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_y \varepsilon)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_z \varepsilon)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+C_{1\varepsilon}\mu_t\frac{\varepsilon}{k}\Phi-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

При этом

$$\mu_e=\mu_t+\mu,$$

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

$$\Phi=2\left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial V_y}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial V_z}{\partial z}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial V_y}{\partial x}+\frac{\partial V_x}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial V_z}{\partial y}+\frac{\partial V_y}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial V_z}{\partial x}+\frac{\partial V_x}{\partial z}\right)^2\right)\right],$$

где ρ – заданная плотность жидкости (ρ = const); V_x, V_y, V_z– проекции вектора скорости жидкости; p – давление в жидкости; μ – заданная физическая (ламинарная) вязкость (μ=const); μ_t– турбулентная (вихревая) вязкость; μ_e – эффективная вязкость; k – кинетическая энергия турбулентности, отнесенная к единице массы жидкости; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности в единице объема жидкости; $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_2, \sigma_\varepsilon$ – эмпирические константы k-ε-модели, C_μ = 0,09, $C_{1\varepsilon}$ = 1,44, C_2 = 1,92, σ_ε = 1,3. Эти значения определены из экспериментов с воздухом и водой для классических турбулентных сдвиговых течений, включающих в себя гомогенные сдвиговые течения и распад изотропной сеточной турбулентности. Они считаются пригодными для широкого класса свободных и ограниченных стенками сдвиговых течений.

Уравнения неразрывности (2), движения (3, 4, 5) и уравнения k-ε-модели (6, 7) записаны в консервативном виде; неизвестными являются $V_x, V_y, V_z, p, k, \varepsilon$.

Граничными условиями для системы уравнений являются:

– для каждой из групп каналов задаются величины давлений на входе и выходе, т. е. есть задается общий перепад давления (при анализе перепад давления составлял 100000 Па);

– в соответствии с условиями прилипания, на всех твердых границах области течения (поверхности стенок каналов и поверхности перемычек) значения составляющих скорости V_x, V_y, V_z равны нули.

Дискретизация исходных дифференциальных уравнений в частных производных (1 – 6) производилась методом конечных объемов. Решение осуществлялось с использованием алгоритма Simplen. Данный алгоритм реализует проекционный метод решения уравнений динамики жидкости в варианте, разработанном группой Патанкара, и обладает улучшенными показателями сходимости по сравнению с другими вариантами алгоритмов семейства Simple [5].

Решения отыскивались для областей, характеризуемых различными углами скрещивания каналов и величин перемычек. Расчетные области покрывались нерегулярной неравномерной расчетной сеткой, состоящей из ~15000 тетраэдальных ячеек. Один из вариантов расчетной области показан на рис. 2.

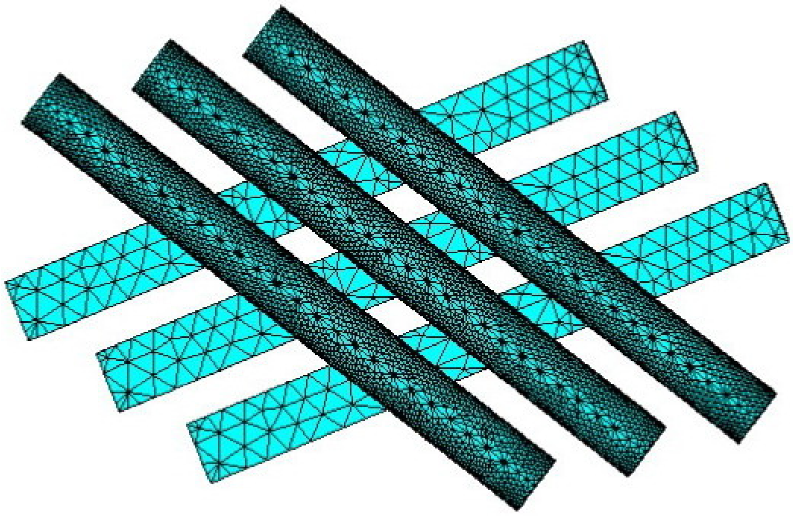

Рисунок 2 – Расчетная область
($\psi = 60^\circ$ или 120°, $\Delta = 2{,}5$ мм)

Как показал анализ, при росте величины перемычки нарушается равномерность распределения падения давления в области скрещивания и, как видно на рис. 3 – 7, при величине перемычки, равной ширине канала, наблюдается следующая картина – после падения давления в месте перекрытия каналов происходит его возрастание на перемычке. Это может быть объяснено тем, что после приобретения вращательного характера движения жидкости в ячейках (местах скрещивания каналов), что в свою очередь является причиной падения давления, поток стремится к перестраиванию и некоторой ламинаризации на перемычке. Данное утверждение не противоречит результатам, полученным в других работах, связанных с исследованием течений в ЦВТ.

Таким образом, вновь было показано, что для сохранения установившегося течения в трактах с взаимно перекрещивающимися каналами необходимо, чтобы перемычка была значительно меньше ширины проточного канала.

Кроме того, как видно на рис. 8 – 12, наиболее равномерное распределение давления по области скрещивания наблюдается при угле скрещивания $\psi = 90^\circ$.

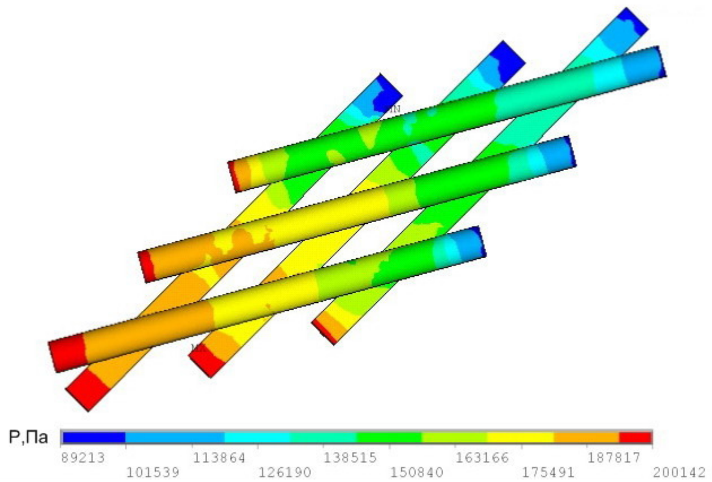

Рисунок 3 – Распределение давления (ψ = 30˚, Δ = 5 мм)

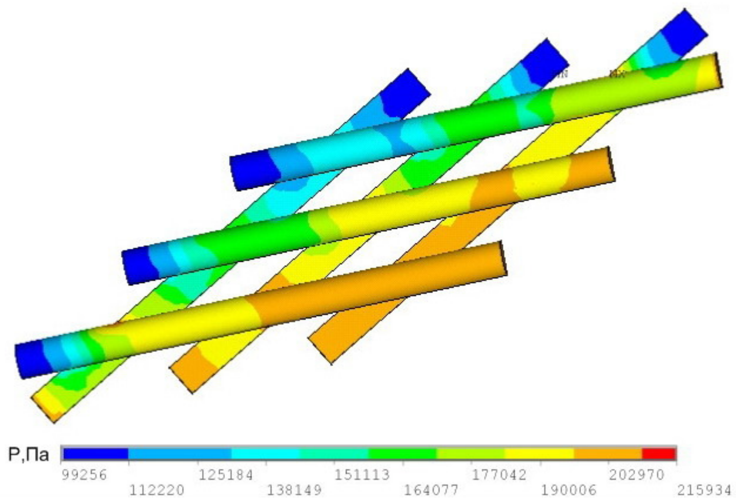

Рисунок 4 – Распределение давления (ψ = 150˚, Δ = 5 мм)

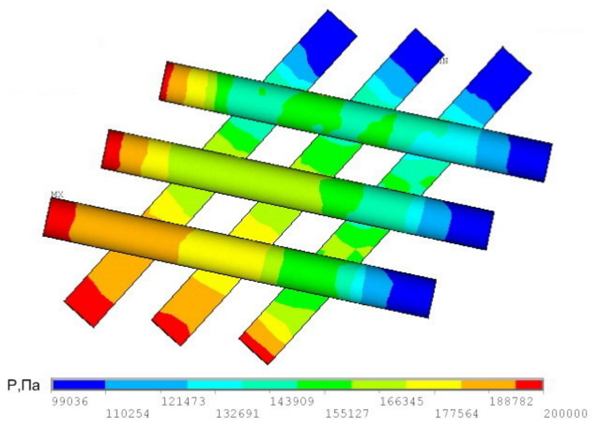

Рисунок 5 – Распределение давления (ψ = 60˚, Δ = 5 мм)

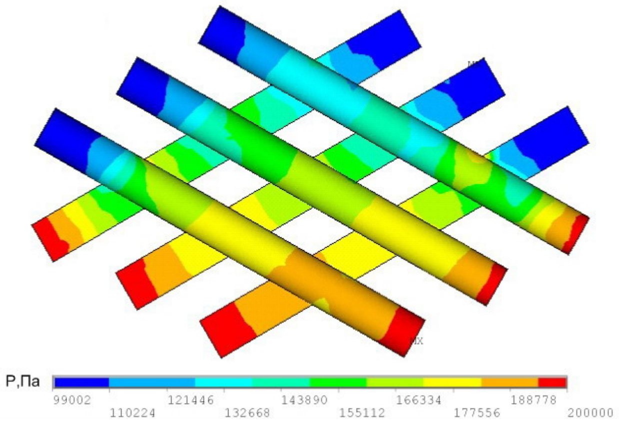

Рисунок 6 – Распределение давления (ψ = 120˚, Δ = 5 мм)

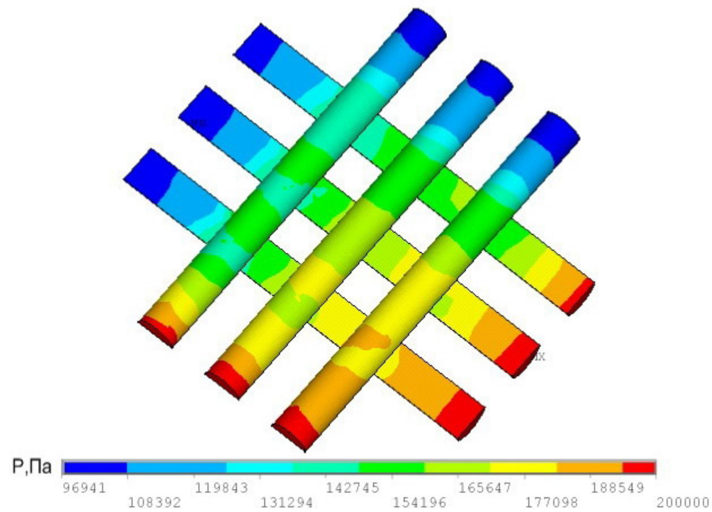

Рисунок 7 – Распределение давления (ψ = 90˚, Δ = 5 мм)

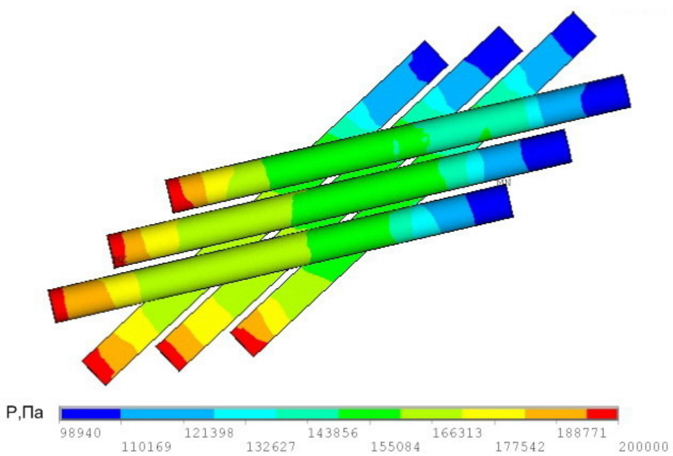

Рисунок 8 – Распределение давления (ψ = 30˚, Δ = 1 мм)

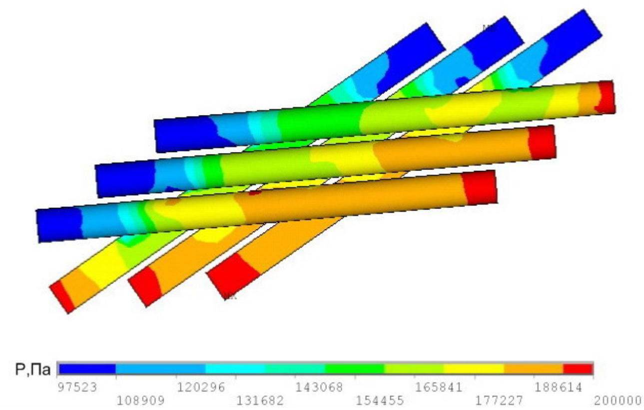

Рисунок 9 – Распределение давления (ψ = 150˚, Δ = 1 мм)

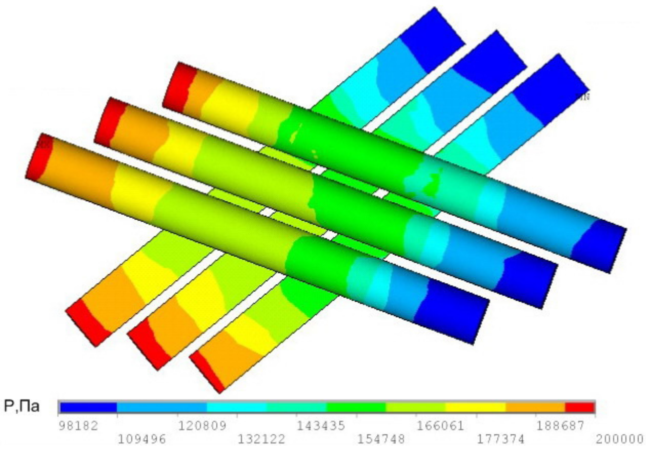

Рисунок 10 – Распределение давления (ψ = 60˚, Δ = 1 мм)

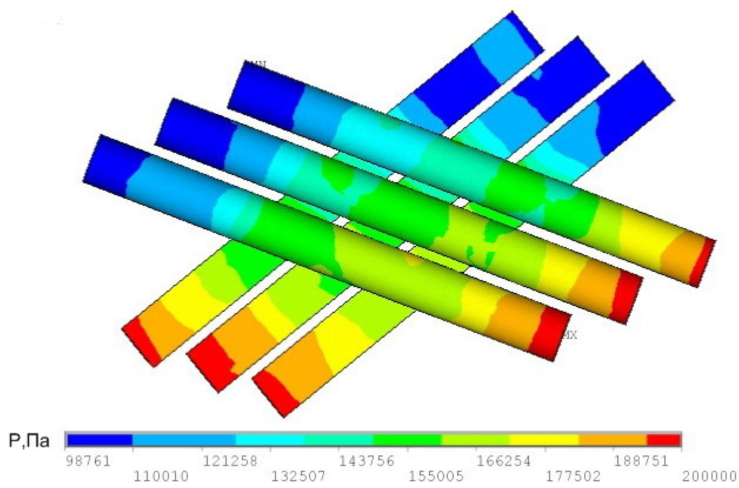

Рисунок 11 – Распределение давления (ψ = 120˚, Δ = 1мм)

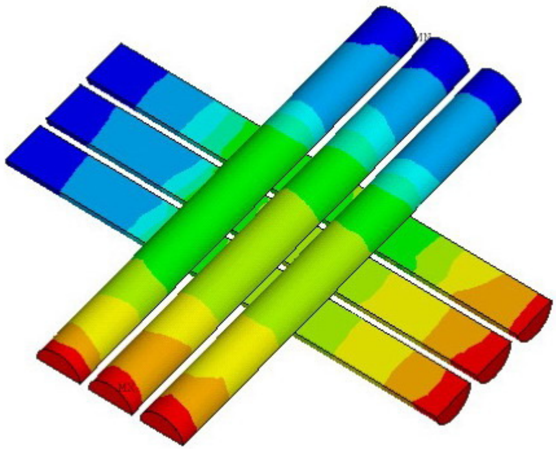

Рисунок 12 – Распределение давления (ψ = 90˚, Δ = 1 мм)

В ходе анализа было также установлено, что именно при угле скрещивания ψ = 90˚ и величине перемычки Δ = 1 мм формируется наиболее равномерное распределение скоростей потоков в каналах обеих групп. Так, например, как видно на рис. 13, при угле скрещивания ψ = 150˚ в области скрещивания наблюдается падение скорости практически до нуля. Картина распределения скорости потока для варианта ψ = 90˚, Δ = 1 мм, представлена на рис. 14.

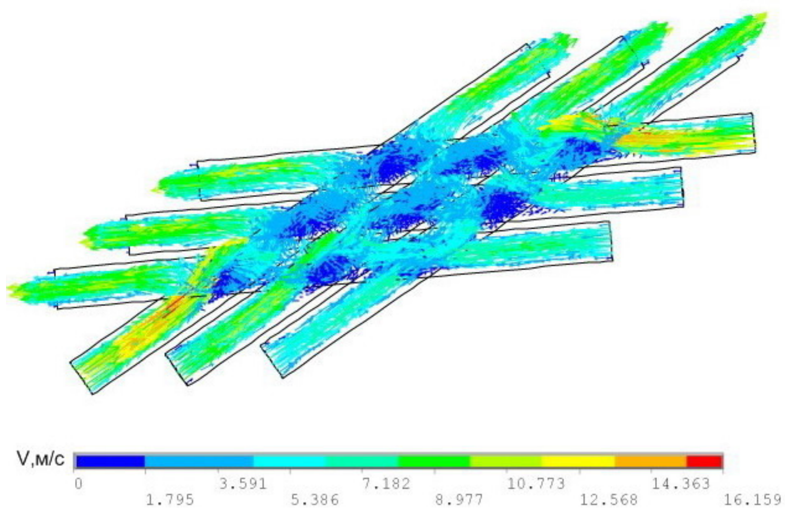

Рисунок 13 – Распределение скоростей (ψ = 150˚, Δ = 1 мм)

Таким образом, в ходе анализа было показано, что течение в трактах с взаимно перекрещивающимися каналами является наиболее общим случаем канального течения жидкости и установлено, что дальнейшие экспериментальные исследования целесообразно проводить для трактов с углом скрещивания ψ~90˚ и величиной перемычки, меньшей ширины канала, так как именно в этом случае формируются наиболее приемлемые условия для интенсификации процессов смешения.

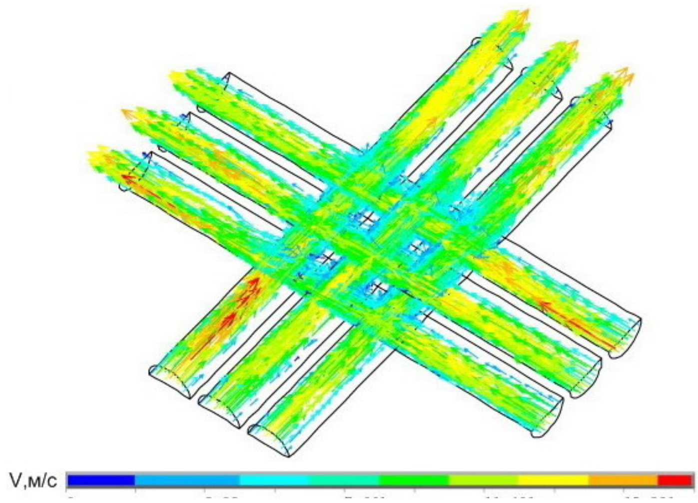

Рисунок 14 – Распределение скоростей (ψ = 90˚, Δ = 1 мм)

Список использованных источников

1. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева/ А.Ф. Савостин, А.М. Тихонов // Теплоэнергетика. – 1970. – № 9. – С. 75 – 78.
2. Характеристики теплопередачи и гидравлического сопротивления теплообменных поверхностей со скошенными каналами и поверхностей из стеклокерамики / Говард (C. P. Hovard) // Энергетические машины и установки: Тр. амер. об-ва инженеров механиков (русский перевод). – 1965. – №1. – С. 85 – 101.
3. Исследование процессов массообмена в гидравлических трактах с взаимно перекрещивающимися каналами / А.М. Грушенко, А.Л. Кирьянчук // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 7(54). – С. 120 – 124.
4. Грушенко А.М. Определение потерь в цилиндрических вихревых трактах // Проблемы машиностроения. – К. 1987. – Вып. 28. – С 96 – 98.
5. Шабаров В.В. Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач: Учеб.-метод. материалы по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». – Нижегородский гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2006.

Поступила в редакцию 10.03.09.
Рецензент: канд. техн. наук, доцент В.В. Чмовж,

Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков