

532.5.013

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

*Сатаев Александр Александрович, Дунцев Андрей Всеволодович*

*НГТУ им. Р.Е. Алексеева*

Моделирование процессов смешения потоков различных по температуре, плотности, структуре и другим параметрам имеет важное значение для оценки теплотехнической надежности реакторных установок, термоциклических пульсаций, анализе безопасности. Для исследования смешения использовалась модель смешения, которая визуализировалась с помощью методов тепловидения. Были рассмотрены впрыск холодной воды в горячий объем, что имитирует подачу теплоносителя в водоводяном реакторе. Кроме того важной задачей было нахождение способов интенсификации этого смешения. С этой целью в принятую модель подавалась двухкомпонентная смесь (вода+газ). Это позволило снизить градиент температур вдоль линии смешения примерно в 2 раза. Полученные результаты дали базу для дальнейшего анализа смешения неизотермических потоков. Затем была использована их визуализация в комплексе вычислительной гидродинамики Solid Works Flow simulation.

**Ключевые слова:** неизотермический поток, смешение, тепловидение, двухкомпонентный поток, интенсификация, визуализация

532.5.013

## VISUALIZATION OF THE PROCESSES OF MIXING NON-ISOTHERMAL FLOWS

*Sataev Alexander Alexandrovich, Duntsev Andrey Vsevolodovich*

*NSTU them. R.E. Alekseeva*

Modeling the processes of mixing flows of different temperature, density, structure, and other parameters is important for assessing the thermal engineering reliability of reactor installations, thermocyclic pulsations, and safety analysis. To study the mixing, a mixing model was used, which was visualized using thermal imaging techniques. The injection of cold water into a hot volume was considered, which simulates the supply of a coolant in a water-water reactor. In addition, an important task was to find ways to intensify this confusion. To this end, a two-component mixture (water + gas) was fed into the adopted model. This allowed to reduce the temperature gradient along the mixing line by about 2 times. The obtained results provided the basis for further analysis of the mixing of non-isothermal flows. Then their visualization was used in the SolidWorks Flow simulation computational fluid dynamics.

**Keywords:** nonisothermal flow, mixing, thermal imaging, two-component flow, intensification, visualization

Современное сложное оборудование и системы, применяемые в энергетике, транспорте, машиностроении требует обязательной оценки их технологичности, эффективности, а также очень важного – это их безопасности. Проведение натурных испытаний и экспериментов, особенно с габаритными установками, часто подчас невозможно, а если и возможно, то затрачивает колоссальные материальные и человеческие ресурсы. Для решения возникающих проблем в настоящее время принято повсеместно внедрять различные методы моделирования процессов протекающих в этом оборудовании.

С развитием компьютерных технологий стало возможным моделирование потоковых процессов в различных программных средах. Под потоковыми процессами понимают

процессы смешения изотермических и неизотермических потоков, стратификация, естественная конвекция и другие процессы в гидродинамики.

Явления и процессы смешения жидкостей широко и постоянно встречаются в природе повсеместно при массообмене теплых или холодных потоков воздуха или воды вихревыми структурами. За последнее десятилетие накоплены обширные экспериментальные данные. Поскольку процесс смешения так часто встречается как в промышленности, так и в повседневной жизни, это создаёт иллюзию полного понимания данного процесса.

Это коснулось и энергетики, в частности ядерной, где моделирование процессов протекающих в оборудовании паро-генерирующего блока не менее важно.

С помощью программных средств, используемых вычислительной гидродинамикой, возможно, визуализировать потоковые процессы в оборудовании ЯЭУ.

Одной из центральных задач, которые должны быть решены для внедрения программ CFD расчета в практику расчетного обоснования реакторных установок, является создание экспериментальной базы. Существующая экспериментальная база, основанная на использовании традиционных систем измерения, практически непригодна для адаптации и верификации программ трехмерного расчета к описанию неизотермических потоков. Существует достаточно представительная экспериментальная база, пригодная для верификации CFD программ к описанию изотермических течений, эта база традиционно используется в автомобильной, авиационной, аэрокосмической промышленности, а высокая актуальность описания неизотермических потоков является специфической особенностью атомной энергетики. Формирование представительных для описания неизотермических потоков экспериментальных данных стало возможным в последние годы, одновременно с появлением систем измерений, позволяющих одновременно определять поля параметров (лазерные методы измерения поля температур и скоростей PIV, LDV, PLIF), тепловизионные методы измерения поля температур, сеточные датчики измерения поля концентраций [6].

Моделирование процессов турбулентного переноса основано на прямом численном решении системы дифференциальных уравнений движения и неразрывности, записанных для мгновенных (актуальных) значений параметров турбулентного потока. Так, например, движение потока несжимаемой жидкости с постоянной вязкостью описывается системой уравнений, включающих уравнение движения в форме Навье-Стокса и уравнение неразрывности.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Уравнение движения в форме Навье-Стокса:

$$\rho \frac{Du}{d\tau} = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dv}{d\tau} = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \frac{Dw}{d\tau} = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Система уравнений является замкнутой, поскольку имеется 4 уравнения для определения 4 искомых величин  $u, v, w, p$ . Однако математическая формулировка задачи в целом остается незамкнутой из-за неопределённости начальных и граничных условий однозначности [4].

Установка для изучения смешения неизотермических потоков представляет собой кювету. Материал двух ее стенок (передняя и боковая) - прозрачное оргстекло толщиной 12 мм. Другие стенки (боковая и передняя) сделаны из стали (Сталь 3), покрытой черной матовой краской. Это необходимо для исключения влияния отражения от поверхности. Параметры и габаритные размеры показаны на рисунке. В настоящей работе изучалось температурное поле модели с подводом струи снизу в объем.

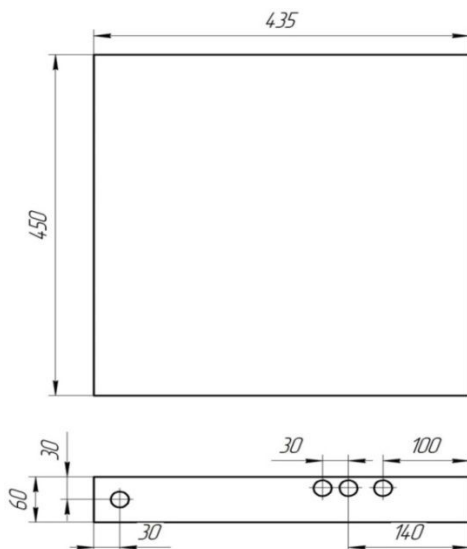


Рис.1 Габаритные размеры кюветы для моделирования процесса смешения

При измерении в качестве выходных данных были получены термограммы температурных полей на поверхности кюветы. Этими данными (в первом приближении) можно в дальнейшем оперировать в качестве граничных условий и для сравнения с компьютерным моделированием смешения неизотермических потоков в других моделях. В результате проделанной работы был накоплен большой объем экспериментальных данных.

При обработке термограмм исследовались максимальная, минимальная, средняя температуры по области смешения потоков, а также на линии, проходящей через центр ядра потока. Также были определены границы смешения (координаты вдоль осей  $x$  и  $y$  потока). Получены соответствующие графики в зависимости от времени смешения. Из графиков видно, что зависимость температур от времени смешения подчиняется экспоненциальному закону, а вот изменение области смешения имеет максимумы, что, скорее всего, связано с неустойчивостью потока. Поэтому задачей на будущее будет являться снижение этой неустойчивости и уменьшение градиентов по расчетной области смешения. Для этих целей было предложено впрыскивать в объем двухкомпонентную смесь (вода+газ (воздух)).

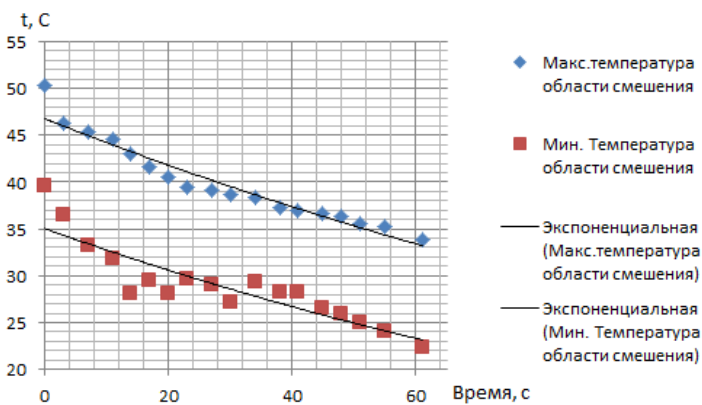


Рис.2 График зависимости температуры области смешения от времени

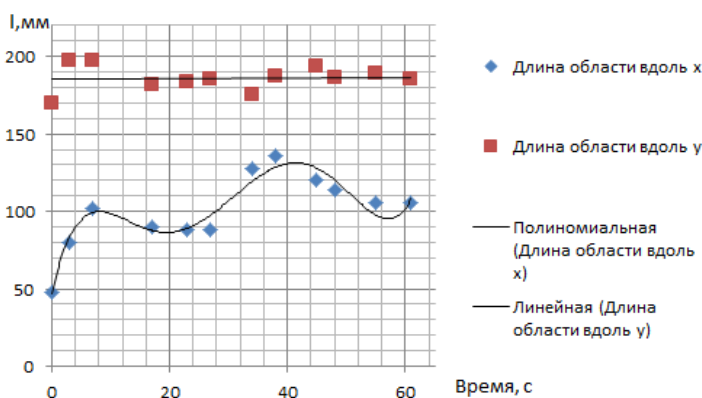


Рис.3 График зависимости длины области смешения и ширины области смешения от времени

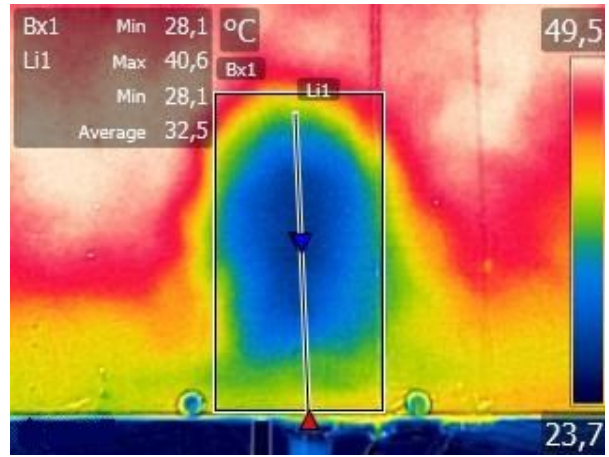
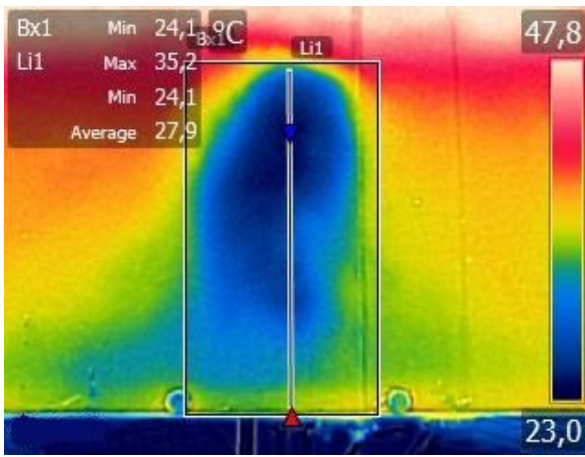


Рис.4, 5 Одиночный кадр смешения (термограммы смешения) фронтальная проекция

На рисунках 6 и 7 изображено смешение неизотермических потоков подачи потока с добавкой газа (одиночный совмещенный кадр (съемка производится одновременно тепловизионной и фотокамерой)).

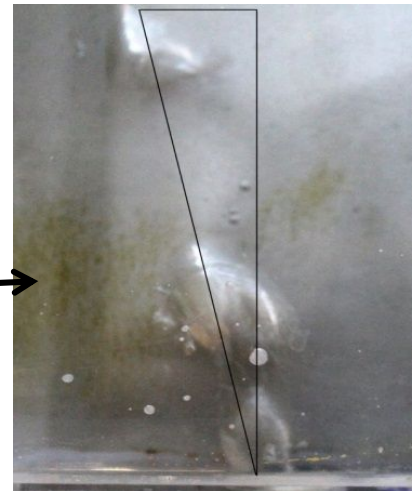
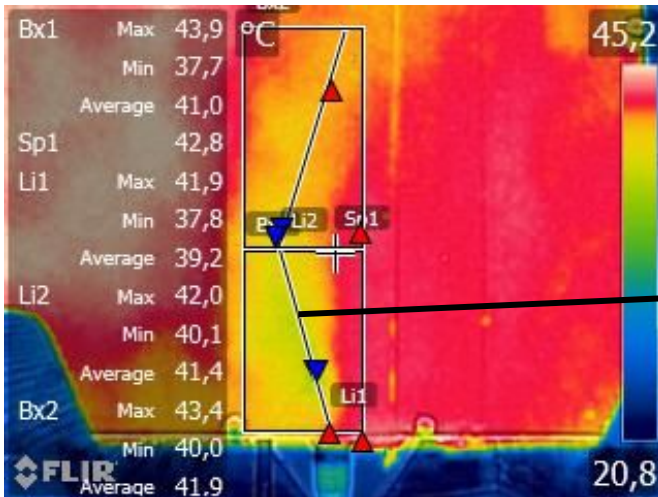


Рис.6 Передняя проекция (съемка тепловизионной камерой) Рис.7 Задняя стенка кюветы

При анализе результатов съемки впрысков неизотермического потока без добавки (газ) и с добавкой было определено, что в среднем градиент температур (разность между максимальной и минимальной температурами вдоль линии смешения) для двухкомпонентного потока меньше в среднем в 2 раза.



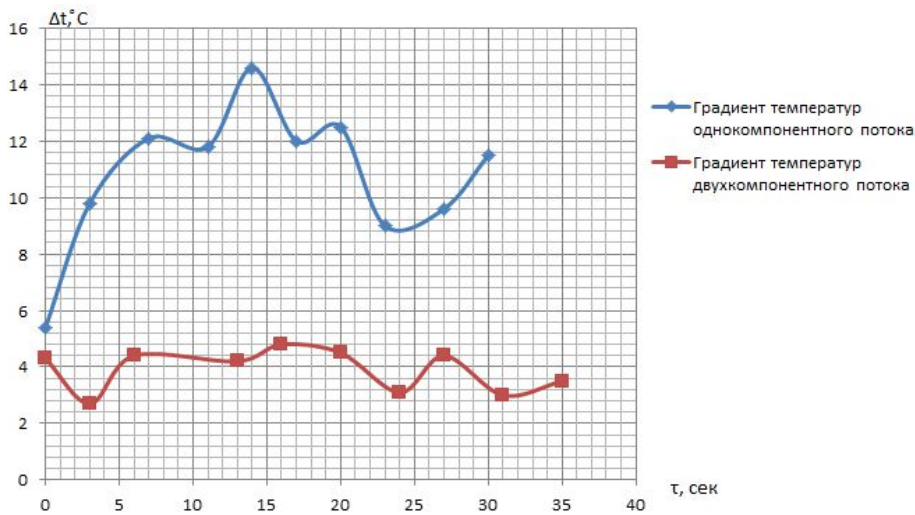


Рис.8 График зависимости градиента температуры для однокомпонентного и двухкомпонентного потоков от времени

Полученные граничные условия и данные потребовали сравнения и верификации в программах CFD моделирования (вычислительная гидродинамика). Полученные результаты показаны на рисунке 9. Для моделирования и верификации результатов использовался анализ впрыска однокомпонентного потока. Для этого применялась расчетная программа Solid Works Flow simulation. Картина оказалась близка к экспериментальной.

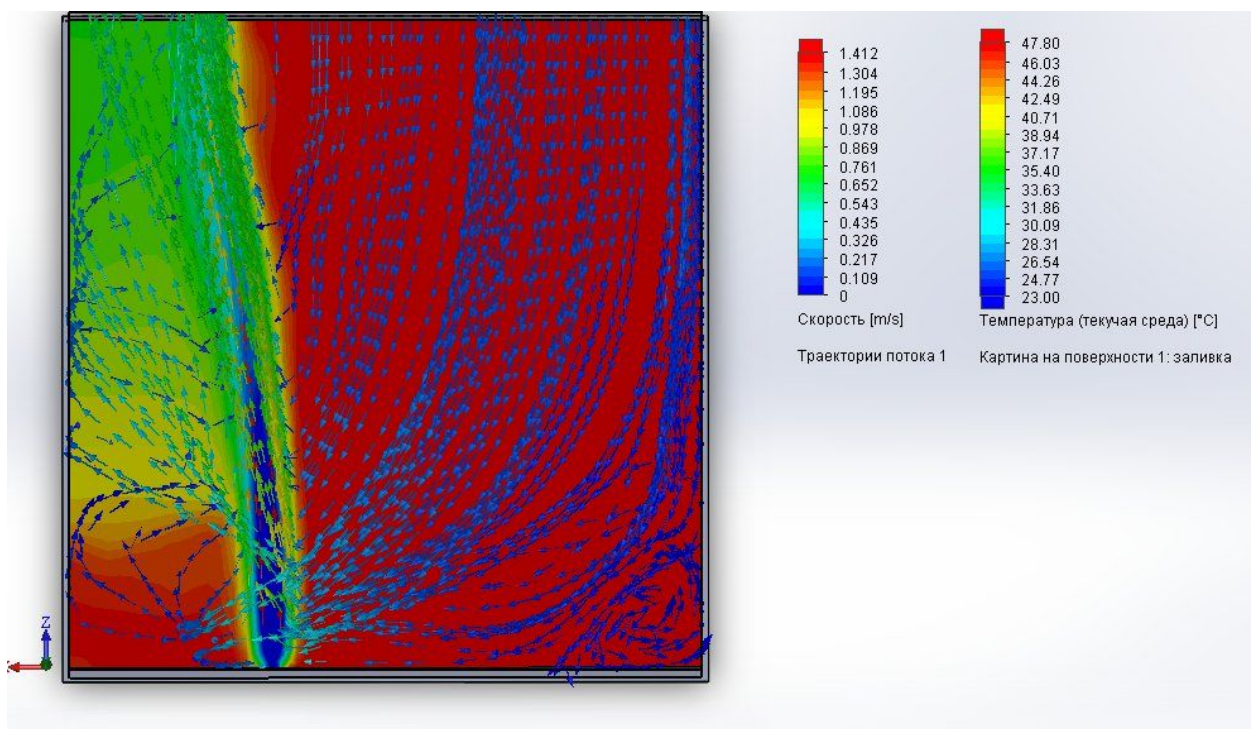


Рис.9 Моделирование процесса смешения в программе SW Flowsimulation

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
- [2] Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа – Москва.: Мир, 1986. – 184 с.
- [3] Деменюк С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Визуализация течения жидкости в каналах: монография – СПб.: Страта, 2014. – 134 с.
- [4] Ковальногов Н.Н. Прикладная механика жидкости и газа / Н.Н. Ковальногов.- Ульяновск УлГТУ, 2010. - 219 с.
- [5] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа — Москва.: 1960. — 676 с.
- [6] Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Обеспечение безопасности АЭС»: сб.ст./[сост. А.С. Зубченко]. – Подольск: ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2012. – 128 с