

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ У ОДНОРЯДНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПУЧКА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ

Коробко В.В., к.т.н, доцент., Лейбович Л.И., к.т.н., доцент
Национальный университет кораблестроения, г. Николаев, Украина

В системах воздушного охлаждения и обогрева широкое применение находят теплообменники, использующие явление свободной конвекции. Интенсификация теплообмена при свободной конвекции в коридорном однорядном вертикальном пучке горизонтальных труб имеет практическое приложение для создания высокоэффективных, компактных аппаратов.

Теплоотдача единичного горизонтального цилиндра в условиях естественной конвекции была изучена достаточно полно, так же подробно исследованы вопросы свободной конвекции вертикального пучка горизонтальных труб. Однако тепловое и гидродинамическое воздействия соседних труб друг на друга мало изучены, кроме этого представляет интерес поведение естественно-конвективного потока в стесненных условиях.

При естественной конвекции скорость свободно-конвективного потока небольшая. Но даже в этом случае возникающие флуктуации размывают ламинарный поток газа, (жидкости) внося существенные изменения в локальные коэффициенты теплоотдачи в горизонтальных трубах, расположенных последовательно за первой трубой в таком пучке.

Существенное влияние на условия перехода оказывают размеры тела, которое обтекает свободно-конвективный поток газа (жидкости). Уже давно установлено, что ламинарное движение окружающей среды переходит в турбулентное еще до верхней кромки у горизонтальных труб большого диаметра. На практике не всегда возможно повысить теплообмен за счет увеличения геометрических размеров. В связи с этим, становится целесообразным поиск альтернативных путей интенсификации процессов теплообмена при естественной конвекции.

Ранее проведенные исследования показывают, что для коридорного расположения горизонтальных труб, расположенных в большом объеме (фактор стеснения потока отсутствует), интенсивность процессов теплообмена значительно снижается после третьего ряда труб. Но для конфузурно – диффузорных каналов это явление не наблюдалось.

Развитие поперечных пульсаций давления при движении свободно-конвективного потока, обтекающего вертикально расположенный пучок горизонтальных труб, в значительной степени интенсифицирует теплообмен при естественной конвекции за счет разрушения ламинарного пограничного слоя у нижней кромки трубы. Расположение такого пучка труб между двумя вертикальными стенками формирует конфузурно – диффузорные каналы для движения потока газа (жидкости).

Авторами, при натурных испытаниях опытных образцов конвекторного обогревателя, был отмечен ряд эффектов, а именно:

- увеличение числа горизонтальных труб в вертикальном пучке не обеспечивало желаемого прироста интенсификации теплообмена;
- смещение осей горизонтальных труб в вертикальном пучке привело к существенной интенсификации теплообмена.

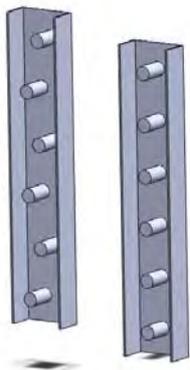


Рис. 1. Эскизы 3-D моделей теплообменных поверхностей.

Проведение вариантных экспериментальных исследований требует значительных временных и материальных затрат, связанных с изготовлением опытных образцов. В то же время современные программные комплексы позволяют эффективно решать подобные задачи и существенно сократить сроки разработки новых изделий. Поэтому было решено провести численное исследование гидродинамических характеристик потока в опытных образцах, максимально полно изучить особенности распределения потоков массы и теплоты, попытаться определить оптимальные характеристики поверхностей.

В настоящей работе был использован CFD пакет [FlowVision](#), который обладает рядом свойств, существенно облегчающих решение исследовательских задач, а именно:

- модели исследуемых каналов и теплообменных поверхностей строятся с помощью любой современной CAD\CAM системы - SOLID WORKS, INVENTOR, и др. и импортируются в среду FlowVision.
- автоматическое построение расчетной сетки и ее последующую автоматическую локальную адаптацию в ходе расчетов;
- удобные и мощные функции анализа полученной информации;

Проверки адекватности численной модели и корректности моделирования была проведена путем сравнения расчетных результатов с экспериментальными данными по естественной конвекции у горизонтальной трубы. Расчеты дали удовлетворительное совпадение с теоретическими решениями и натурными экспериментами.

Модель теплообменника строилась в CAD\CAM системе INVENTOR. Геометрические характеристики теплообменной поверхности:

- диаметр труб - 22 мм, шаг в вертикальном однорядном пучке - 80 мм,
- шаг поперечного оребрения 10 мм, расстояние между вертикальными стенками, ограничивающими поток - 80 мм.

Температура стенки трубы 80°C , температура воздуха - 25°C . Изменяемый параметр - отклонение центров осей труб от вертикальной оси канала, этот параметр изменялся в пределах от 20 до 40 мм. Исследуемый параметр - отклонение центров осей труб от вертикальной оси канала, этот параметр изменялся в пределах от 10 до 50 мм.

Задача решалась в 3-х мерной, нестационарной постановке, на модели полностью сжимаемой жидкости. В ходе пробных расчетов были уточнены параметры расчетной модели, (временной шаг, условия адаптации расчетной сетки, размеры бокса), которые позволили оптимизировать расчет и получить хорошее совпадение с экспериментальными данными для тестовых поверхностей.

Так, при температуре труб - 80°C , скорость свободно-конвективного потока на выходе из опытного конвектора составляет $0,70 - 0,75 \text{ м/с}$, что совпадает с данными численного моделирования. Рассчитанные теплообменные характеристики тестовых моделей также хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В ходе расчетов были получены данные о 3-D гидродинамической структуре потока, распределении скоростей в потоке, температурных полях, распределении плотности, распределении теплового потока по поверхности каждой из трубок.

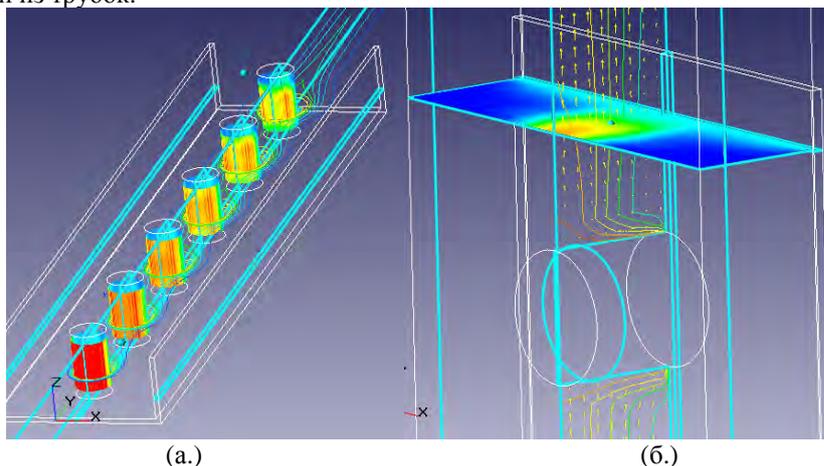


Рис. 2. Распределение скоростей и температуры потока (а), распределение интенсивности теплового потока по поверхности трубок (б).

Интенсивность теплоотдачи от труб в вертикальном пучке уменьшается по мере увеличения порядкового номера трубки, что объясняется эффектом теплового следа, см. Рис. 2(б).

В случае горизонтального смещения трубок наблюдается прирост интенсивности теплопередачи, что иллюстрирует Рис. 3.

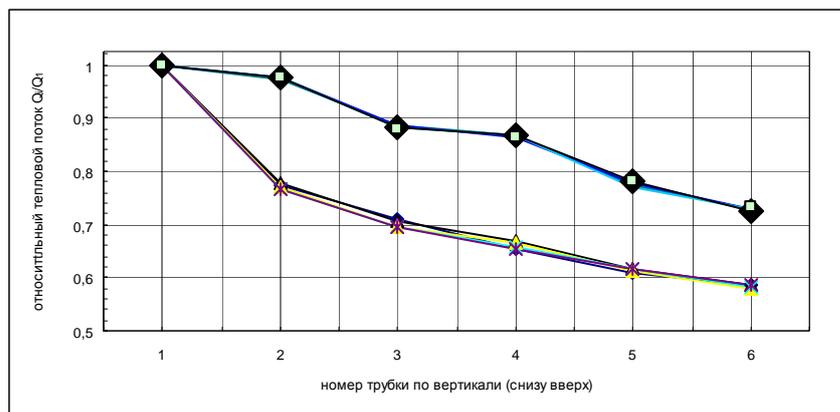


Рис. 3. Потоки тепла от последовательно расположенных трубок.

Смещение трубок относительно вертикальной оси существенно меняет характер течения в канале, существенно снижая влияние теплового следа. Физические процессы хорошо иллюстрирует визуализация полей температуры и тепловых потоков в смещенном пучке рис. 4.

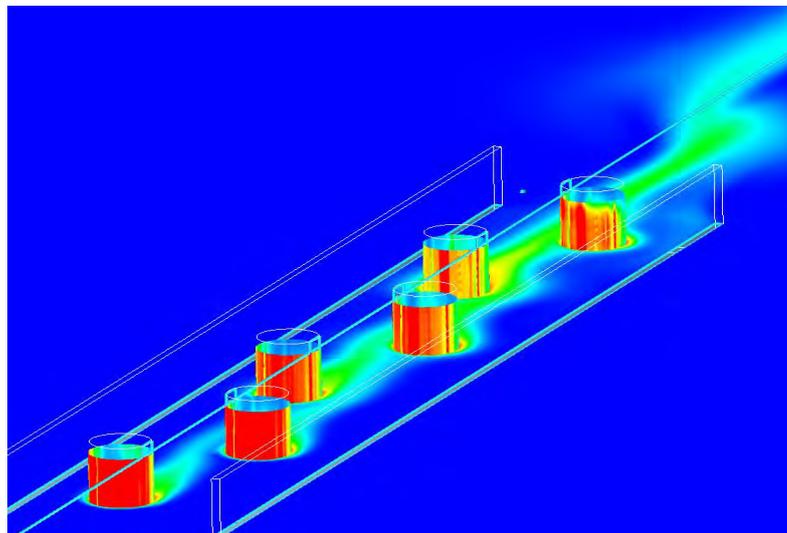


Рис 4. Температурное поле и потоки теплоты в смещенном пучке (изображение повернуто).

В ходе численного моделирования были достаточно подробно изучены гидродинамические характеристики свободно конвективных потоков в стесненных конфузурно - диффузорных каналах и их влияние на процессы переноса тепла.

Необходимо отметить, что моделирование проводилось для изначально не возмущенного потока. По мере выполнения расчетных итераций в расчетном объеме возникали вторичные потоки, значительно влияющие на характер потока в исследуемой части канала, на температуру воздуха на входе в канал. Для снижения этих эффектов приходилось увеличивать объем расчетной области, либо ограничивать время расчетов. Вполне очевидно, что такие же процессы имеют место и при натуральных экспериментальных исследованиях.

При численном моделировании эти явления очевидны и можно «уменьшить» их влияние на результат. В натурном эксперименте исследователи лишены возможности контролировать в полном объеме условия окружающей среды, особенно это касается влияния внешней макротурбулентности на низкоскоростные потоки, что характерно, к примеру, для случая естественной конвекции.

Очевидно, что тепловой поток имеет большую интенсивность, так как эффект теплового следа существенно меньше в сравнении со строго вертикальным расположением трубок, см. Рис. 2(б). Об изменении степени интенсивности теплоотдачи от разных трубок можно судить по плотности заливки (цвету) поверхности трубок. Первые по ходу потока трубки омываются холодным воздухом и максимальный температурный градиент обеспечивает интенсивную теплоотдачу. Последующие трубки работают в развивающемся тепловом следе с постоянно уменьшающейся разницей температур.

В результате расчетов были детально изучены характеристики потока в конфузурно - диффузорных каналах, пристенные течения, возвратные течения в области ребро – трубка. Были рассчитаны значения теплового потока на поверхности каждой из трубок, найдены оптимальные соотношения размеров обеспечивающие интенсивную теплоотдачу.

Численное моделирование позволило оценить влияние некоторых факторов окружающей среды на результаты проведения экспериментальных исследований различных явлений в низкоскоростных потоках.

Использование возможностей [FlowVision](#) и удобное взаимодействие с CAD\CAM системами позволило быстро решить задачу разработки нового конвектора, который готовится к натурным испытаниям.