

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕПРОХОДНЫХ КАНАЛОВ
ТЕПЛОТРАСС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА**

магистр техн. наук Т. В. БУБЫРЬ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Аннотация. Для решения задачи повышения эффективности эксплуатации тепловых сетей, размещенных в непроходных каналах, предложено схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного теплоиспользования [1]. Предложена принудительная вентиляция канала наружным воздухом с последующим охлаждением воздуха и утилизацией отводимой теплоты. Определяющим для реализации данной технологии повышения эффективности эксплуатации рассматриваемых теплопроводов, является исследование процессов теплообмена между потоком воздуха и трубопроводами сетевой воды, между потоком воздуха и стенками канала. Использование какой-либо реально экспериментальной установки связано с неприемлемой идеализацией и соответствующей погрешностью, непригодной для практического использования. Соответствующие натурные испытания могут рассматриваться только для проверки адекватности экспериментальных результатов. Выходом из этой ситуации может стать обращение к виртуальной экспериментальной установке, создаваемой на базе стандартного программного комплекса, в данном случае используется ANSYS. В работе рассматриваются подходы создания виртуальной экспериментальной установки для проведения исследования теплообмена и аэродинамики в продуваемых непроходных каналах теплотрасс и методики проведения эксперимента с применением теории планирования эксперимента.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплоснабжение, теплотрасса, непроходные каналы, теплообмен, математическая модель.

Основная часть. Теплотрассы в непроходных каналах имеют достаточно большой удельный вес в существующих системах централизованного теплоснабжения Беларуси (около 50%). Учитывая высокую стоимость изготовления и прокладки теплопроводов, их полная замена с применением инновационных технологий, в городах республики займет еще не одно десятилетие. Поэтому остаются актуальными разработка и исследование технологий повышения энергоэффективности эксплуатации теплопроводов в непроходных каналах. Определяющим этапом разработки технологии, представленной в [1], является исследование теплообмена внутри канала между его конструкциями и потоком воздуха, продуваемого через

канал. Конвективный теплообмен с перечисленными составляющими конструкции канала достаточно сложно привести к той или иной канонической форме, позволяющей использовать имеющиеся расчетные зависимости. Несоизмеримо сложнее найти решение при совместном рассмотрении протекающих процессов вынужденной конвекции. Теплообмен протекает в канале сложной формы, определяемой по длине канала наличием опор, компенсаторов и поворотов. В поперечном сечении размеры конструкции и стеснение потока воздуха определяются типоразмерным рядом диаметров трубопроводов сетевой воды.

Исследование процессов аэродинамики и теплообмена в подобных объектах, имеющее своей целью получение приемлемой достоверности результатов, требует принципиально новых подходов. Одним из которых является вычислительный эксперимент на основе применения методов конечных разностей, конечных элементов и граничных элементов [2–4]. В качестве одного из универсальных решений является применение программного комплекса ANSYS, наиболее удобной из CAE-систем, предназначенных для компьютерного моделирования и анализа различных физических процессов, в рамках которого удобно построить виртуальную экспериментальную установку.

Достоинством инструментария ANSYS является то, что они позволяют связывать и объединять различные приложения для расчета задач механики твердого тела, гидро- и газодинамики, теплообмена и электромагнетизма. Программный комплекс ANSYS позволяет проводить численный анализ всего многообразия задач сплошных сред и предоставляет широкие возможности для подготовки геометрических и сеточных моделей с последующей обработкой результатов расчета. Программный комплекс ANSYS основан на эффективных алгоритмах, позволяющих существенно сократить время расчета ресурсоемких задач.

На рисунке 1 представлена характерные геометрические особенности объекта исследования.

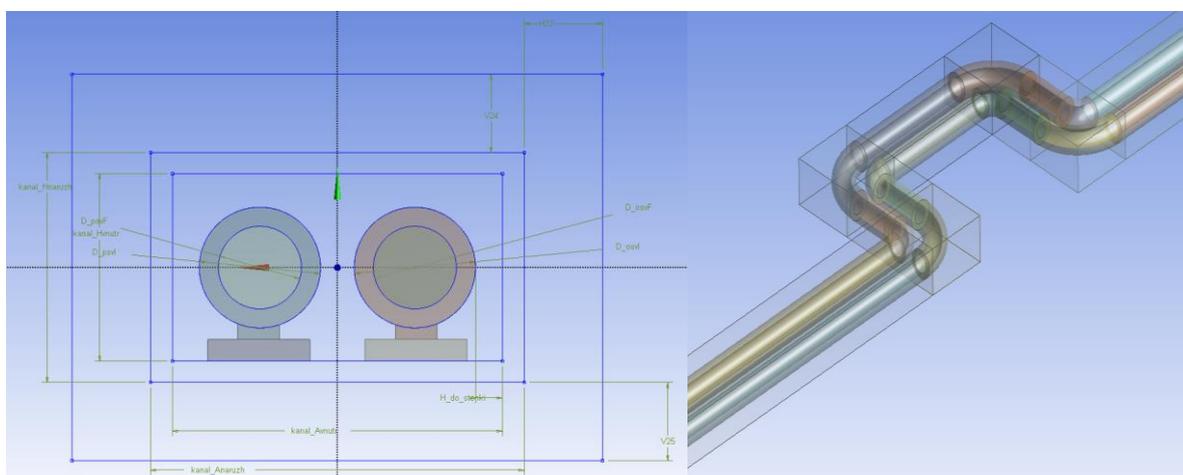
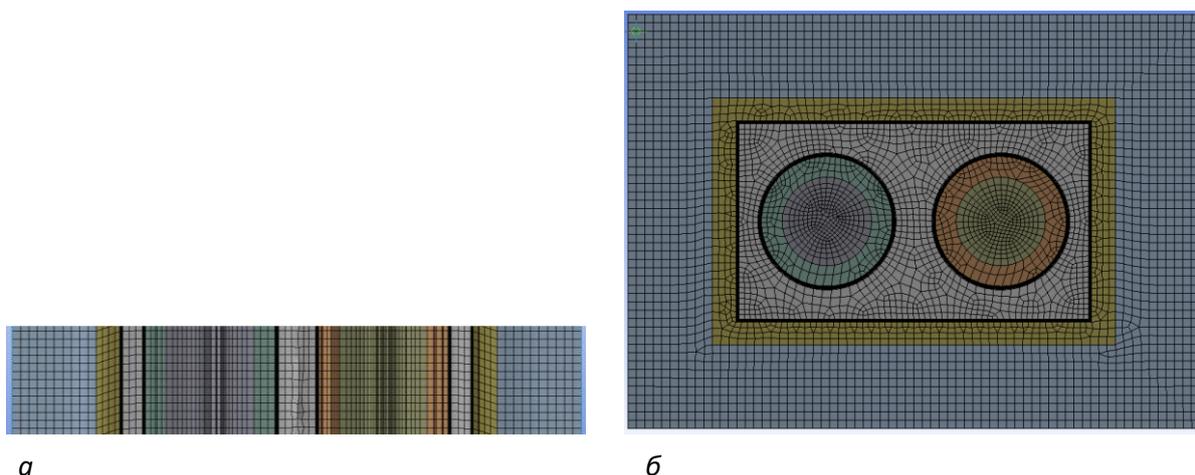


Рисунок 1. – Характерные геометрические особенности канала и теплопроводов

На рисунке 2 приведена рабочая расчетная область модели, объединяющая канал и массив грунта вокруг него. Показана расчетная сетка в поперечном сечении и на фрагменте продольного сечения канала, в основе которой лежат конечные элементы, представленными каноническими формами: тетраэдрами, пирамидами, призмами, шестигранниками. Большая часть элементов была построена шестигранниками для получения структурированной сетки.



а – фрагмент продольного сечения канала; б – фрагмент поперечного сечения канала

Рисунок 2. – Общий вид расчетной сетки

Безусловным требованием, определяющим максимальный размер элемента и его каноническую форму, является выполнение сходимости процесса численного решения. Важным фактором построения сетки является соответствие канонической формы элементов разбиения сложности конструкции канала. Другим условием является обеспечение требуемой точности решения. Общее число элементов в модели колеблется от 5 до 15 млн единиц. Достаточно большое количество элементов связано как с максимальной длиной участка (100 м), так и с максимальным поперечным сечением канала (1,7×2,5 м). Кроме того, расчетное сечение включает грунт вокруг канала на толщину 0,5 м. При этом минимальная длина канала составляет 20 м и сечение (1,5×2 м). Вблизи поверхностей рассматриваемой геометрии укладывался тонкий слой призматических элементов толщиной, обеспечивающий безразмерный параметр y^+ , учитывающий структуру пограничного слоя. Значение указанного параметра рекомендуется принимать в диапазоне 30–100 [2]. Меньшее значение не допускается, поскольку пристенные функции, используемые в решателе Ansys, дадут неверный результат. Значения, близкие к верхней границе диапазона, требуют меньших ресурсов, но приводят к снижению точности решения. В расчетах принята величина y^+ , равной 50. Сходимость процесса определялась по достижению совпадения соседних значений итераций величин температуры, напора, массового расхода, характеризующиеся

величиной менее 10^{-3} , что достигалось после 2 тыс. итераций. Для решения использовался компьютер с 26 ядрами и 128 Гб ОЗУ. Геометрические размеры конструкций тепловых сетей определялись по действующим ТКП [5, 6].

В соответствии с описанными условиями расчеты с помощью программного комплекса ANSYS позволили получить для тестовых экспериментов следующие поля распределения скоростей, представленные на рисунке 4.

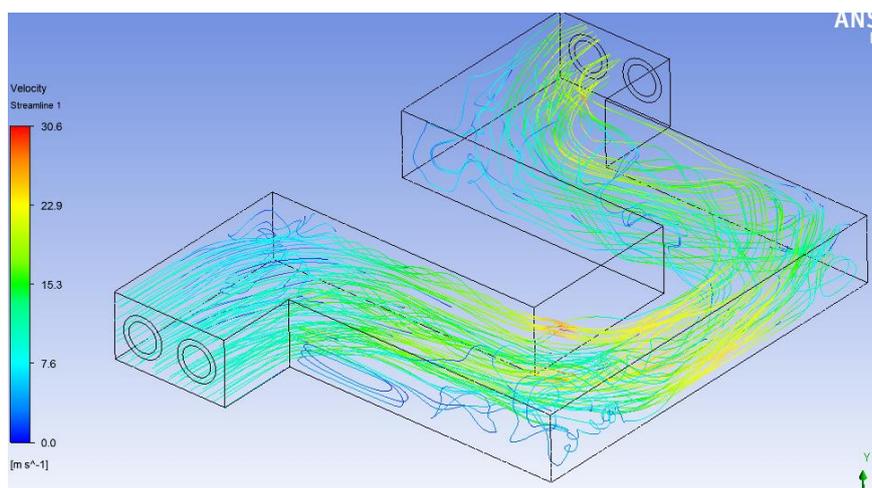


Рисунок 4. – Линии тока течениях воздуха в канале

Учитывая сложность решаемой задачи, было решено провести численное исследование с применением методов математического планирования эксперимента, что позволяет снизить затраты на проведение самого эксперимента с одной стороны, и привести полученные в ходе исследования результаты к виду, удобному для использования в инженерной практике. Выбор плана, большей частью, определяется интуицией и опытом экспериментатора [7]. Максимальная точность в нахождении коэффициентов уравнения регрессии достигается в случае использования планов полного факторного эксперимента (ПФЭ) [8]. Эти планы удачны для линейных моделей, используемых при решении задач оптимизации [9]. В нашем случае модель, предположительно, нелинейная, и на данном этапе требуется лишь корректное описание значений функций отклика в исследуемой области. Эти обстоятельства продиктовали выбор 6-факторного ротatable центрального композиционного плана (РЦКП). План включает ПФЭ только в вершинах гиперкуба. В звездных точках величина плеча, определяемая числом факторов и типом плана, составляет 2,3784, при этом, значение факторов в этих точках не должно выходить за границы установленного диапазона изменения факторов. В центральной точке плана имеется два повторения.

Матрица 6-факторного РЦКП приведена [10] и содержит 46 точек. В каждой точке спектра плана проводят только один опыт, в вычислительных экспериментах опыты проводят в соответствии с матрицей спектра плана, так как предполагается

отсутствие систематических ошибок и поэтому нет необходимости в рандомизации опытов [11].

Выводы

1. В виду сложности создания адекватной физической модели и не возможности проведения полноценного промышленного эксперимента на действующем объекте с целью получения исходной информации для разработки методики проектирования системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах была рассмотрена возможность создания виртуальной экспериментальной установки для исследования процессов аэродинамики и теплообмена в непроходных каналах на базе программного комплекса ANSYS, позволяющей реализацию технологии исследования в контексте использования теории планирования эксперимента.

2. Возможности, представляемые программным комплексом ANSYS, позволили создать виртуальную экспериментальную установку. Выполненные тестовые численные эксперименты показали приемлемое совпадение результатов с физическими представлениями протекающих процессов.

3. Анализ процессов теплопереноса, имеющих место в непроходных каналах теплотрасс при реализации исследуемой технологии регенеративно-утилизационного теплоиспользования в системах централизованного теплоснабжения, позволил определить функции откликов и состав определяющих факторов. Обоснован выбор плана для численного эксперимента в виде 6-факторного ротатабельного центрального композиционного плана, определены уровни варьирования факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 4 (97). – С. 2–6.
2. Федорова, Н. Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
3. Самарский, А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики : учеб. пособие для вузов / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. – М. : Наука, 1992. – 424 с.
4. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. – М. : Наука, 1984. – 520 с.
5. Тепловые сети. Строительные нормы проектирования = Цеплавья сеткі. Будаўнічыя нормы праектавання : ТКП 45-4.02-182-2009 (02250). Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – 2010. – 53 с.
6. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Правила расчета = Цеплавая ізаляцыя абсталявання і трубаправодаў. Правiлы разліку : ТКП 45-4.02-129-2009 (02250). Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – 2010. – 52 с.
7. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров – М. : «Легкая индустрия», 1974. – 262 с.

8. Зедгинидзе, И. Т. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Т. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.
9. Новик, Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении: Раздел 2 / Ф. С. Новик. – М. : МИСИ, 1970. – 79 с.
10. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание) / В. З. Бродский и [др.]. – М. : «Металлургия», 1982. – 752 с.
11. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск : Новое знание, 2013. – 584 с.