

ФАНО России

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук

**ОТЧЁТ**

**О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ**

**НА КЛАСТЕРЕ НГУ**

Выполнили: Макаров М.С.

Наумкин В.С.

Новосибирск, 2015

**Название работы:** Расчётные исследования и обоснование теплогидравлики нагревательной установки.

**Состав коллектива:** Макаров Максим Сергеевич - к.ф.-м.н.; Сахнов Алексей Юрьевич - к.ф.-м.н.; Терехов Владимир Викторович - д.ф.-м.н.; Наумкин Виктор Сергеевич - аспирант;

**Постановка задачи:**

Целью работы является детальное экспериментально-теоретическое исследование гидродинамических и тепловых процессов в рабочих участках нагревательной установки с трубчатыми тепловыделяющими элементами, оснащёнными винтовыми рёбрами и без них для перспективных теплоносителей с малым числом Прандтля (гелий-ксенон).

**Современное состояние вопроса:**

Современное энергетическое оборудование, работающее по замкнутому циклу Брайтона, предполагает использование гелий-ксеноновых смесей в качестве теплоносителя для увеличения термического КПД. При этом важно иметь достоверную и точную информацию как о термодинамических свойствах гелий-ксеноновых смесей, так и о коэффициентах переноса в широком диапазоне температур и давлений в каналах теплообменников различной геометрии.

Среди ряда экспериментальных и теоретических работ, посвящённых исследованию термодинамических характеристик, конвективной теплоотдачи и гидравлического сопротивления, следует выделить работу (Tournier J.-M., 2008), в которой авторы обобщили большое количество как расчётных, так и экспериментальных исследований чистых инертных газов и их бинарных смесей. Экспериментальные исследования свойств гелий-ксеноновых смесей, рассмотренные в этой работе, включают диапазон давлений от 0.1 до 20 МПа и температур до 1400 К.

В работе (El-Genk M.S., 2008) показано, что коэффициент теплоотдачи к потоку бинарной газовой смеси является нелинейной функцией от соотношения компонент смеси, поскольку зависимость коэффициента теплоотдачи к гелий-ксеноновой смеси от доли ксенона в составе смеси имеет выраженный максимум.

В работе (Taylor M.F., 1988) проведено исследование конвективного теплообмена при вынужденном течении бинарных газовых смесей, в том числе гелий-ксеноновых, с

низким числом Прандтля в круглой трубе. Полученные результаты сравнивались с формулами Диттуса-Болтера, Колбурна, Кейса, Петухова-Попова, Слейчера-Роуза и Гнелински. Показано, что в диапазоне чисел Прандтля от 0.18 до 0.72 лучше всех с экспериментальными данными согласуются формулы Петухова-Попова и Кейса. Несмотря на достаточно большое количество проведённых исследований различных аспектов поведения гелий-ксеноновых смесей в качестве теплоносителя задача исследования динамики течения и теплообмена в условиях высоких температур и давлений, а так же построения адекватных численных моделей остается актуальной. Кроме того, задача исследования гидродинамики и теплообмена при течении гелий-ксеноновой смеси важна применительно к каналам сложной формы, которые являются элементами теплообменного оборудования.

#### **Научная новизна:**

В ходе исследований планировалось впервые провести расчёты течения гелий-ксеноновой смеси в каналах с закруткой потока с применением различных моделей турбулентности и моделей турбулентного теплообмена, а также расчёт теплообмена в каналах со сложной формой поперечного сечения.

#### **Описание работы, включая используемые алгоритмы.**

Расчёты были выполнены с помощью пакета программ ANSYS Fluent, параметрического генератора расчётных сеток и модуля расчёта свойств смесей благородных газов собственной разработки, основанного на данных работы [Jean-Michel Tournier, Mohamed S. El-Genk. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Bryton Cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008 №49 P.469-492.]. Задача рассчитывалась для стационарного режима по неявной схеме с учётом теплопроводности стенки.

#### **Полученные результаты:**

Был рассмотрен теплообмен в потоке гелий-ксеноновой смеси внутри канала треугольного поперечного сечения. В начале канала располагался адиабатный участок круглого поперечного сечения длиной 120 мм, предназначенный для стабилизации течения. Внешний диаметр участка стабилизации равнялся 5 мм, толщина стенок трубки 0.15 мм. Длина ребра треугольного канала составляла 5.4 мм. Гидравлический диаметр канала треугольного сечения равнялся 2.82 мм. Длина канала вместе с адиабатным уча-

стком составляла 910 мм. Считалось, что стенки канала изготовлены из никеля со следующими свойствами:  $\rho = 8900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 91.74$  Вт/м·К,  $c_p = 460.6$  Дж/кг·К.

Внешний вид канала и расчётная сетка показаны на рис. 1.

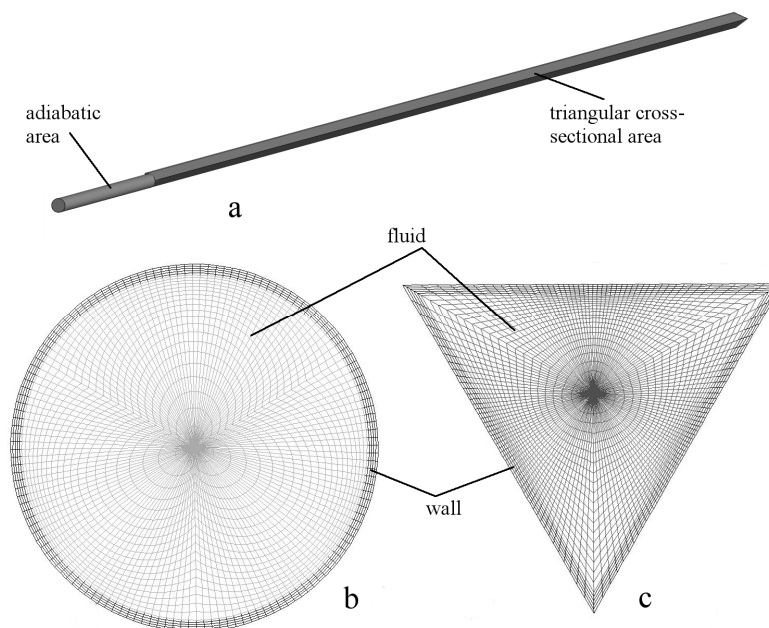


Рис. 1. Внешний вид исследуемого канала (а), расчётная сетка на входе в канал (b) и на выходе (c) из него.

Свойства гелий-ксеноновой смеси рассчитывались по параметрам потока на входе в канал, и принимались постоянными по длине (таблица 1).

Таблица 1 Свойства гелий-ксеноновой смеси

$K_{He}, \%$	$\mu, \times 10^6$ [Па·с]	$c_p, [Дж/кг·К]$	$\lambda, \times 10^3$ [Вт/м·К]	$M, [Г/МОЛЬ]$	Pr
7.2	25.58	527	65.15	39.9	0.206
9.1	25.8	623.3	74.3	33.7	0.216
10.2	25.75	678.2	79	31	0.221

Для моделирования турбулентности использовалась модель Spalart-Allmaras со стандартными параметрами: масштаб турбулентности - 1 м, степень турбулентности 10%, использовалась модель постоянного турбулентного числа Прандтля  $Pr_t = 0.85$ .

Температура на входе в канал составляла  $T \approx 300$  К. Давление на входе варьировалось от 3.8 до 4.2 Бар, на выходе от 3.7 до 4 Бар. По заданному перепаду давления определялся расход, соответствующий числам Рейнольдса от 9500 до 30000.

Тепловой поток  $q$  с постоянной по длине интенсивностью от 5700 до 8000 Вт/м<sup>2</sup> подводился через внешнюю стенку к газовой смеси. Подвод тепла осуществлялся только на участке с треугольным поперечным сечением.

На рис. 2 представлены поля продольной скорости (а) и температуры (b) в сечении  $X / L = 0.824$  от входа в канал для случая течения гелий-ксеноновой смеси с концентрацией гелия 9.1%. В этом случае интенсивность теплового потока равнялась  $q=5787 \text{ Вт/м}^2$ , а число Рейнольдса -  $Re_D=9970$ . Видно, что в углах канала происходит увеличение температуры газовой смеси и стенок примерно на 24 градуса, по сравнению с температурой на оси канала. Это происходит из-за торможения потока в углах канала и более сильного прогрева газовой смеси.

Полученное распределение температуры по внешней стороне треугольной части канала представлено на рис. 3а (вышеуказанный случай обозначен полыми ромбами). Сплошными ромбами обозначены экспериментальные данные. Разница температуры в углах и по середине боковой поверхности составляет не более 1 К, как в эксперименте, так и в расчётах. Несовпадение температуры на боковой поверхности треугольной трубки в эксперименте и расчёте (примерно 4 К) связано с различием в расходах. Расход, измеренный расходомером в эксперименте и расход, рассчитанный по перепаду давления на концах трубки из экспериментальных данных, отличались из-за погрешности измерительных приборов. Так же разница в температурах может быть связана с различием между подводом теплоты через внешнюю стенку и подводом теплоты с помощью объёмного тепловыделения, полученного в эксперименте за счёт подвода электрического тока к стенкам канала. Клеммы источника питания подсоединялись в начале и в конце треугольной части канала.

Однако в безразмерном виде (рис. 3б) экспериментальные и расчётные данные достаточно хорошо обобщаются. Небольшое отличие экспериментальных и расчётных данных на правой термопаре связано с погрешностью измерения термопары.

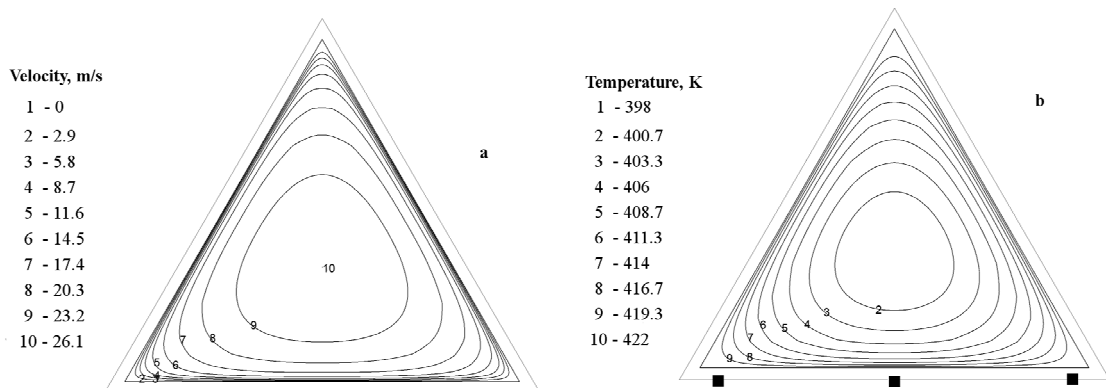


Рис. 2. Поле продольной скорости (а) и температуры (b) в сечении  $X / L = 0.824$  от входа в канал. Точками обозначены места крепления термопар на боковой поверхности

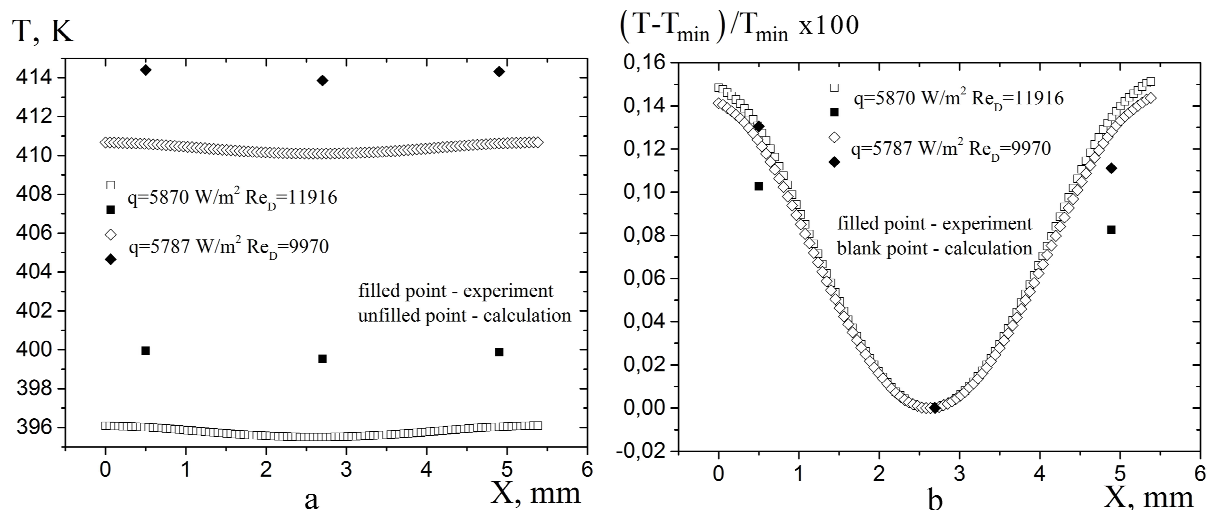


Рис. 3. Распределение температуры по боковой стороне канала в сечении  $X / L = 0.824$  от входа в канал(а), распределение безразмерной температуры по боковой стороне канала (б).

Распределение локального числа Нуссельта по боковой поверхности представлено на рис. 4. Видно, что максимум теплоотдачи наблюдается на оси симметрии боковой грани, где омывающий стенку поток газовой смеси имеет большую скорость по сравнению с углами канала. Так же как и в каналах круглого поперечного сечения, с увеличением  $Re_D$  происходит увеличение числа Нуссельта, что может говорить о турбулентном режиме течения в рассматриваемых условиях. Однако, если рассмотреть изменение приведённого коэффициента гидравлического сопротивления по длине канала, рассчитанного по перепаду давления от начала канала до текущего сечения, представленного на рис. 5, то видно, что  $\xi / \xi_0$  во всех случаях уменьшается по длине и даже в конце канала не выходит на постоянное значение. Это говорит о том, что полученные результаты численного моделирования и экспериментальные данные относятся к участку гидродинамической стабилизации.

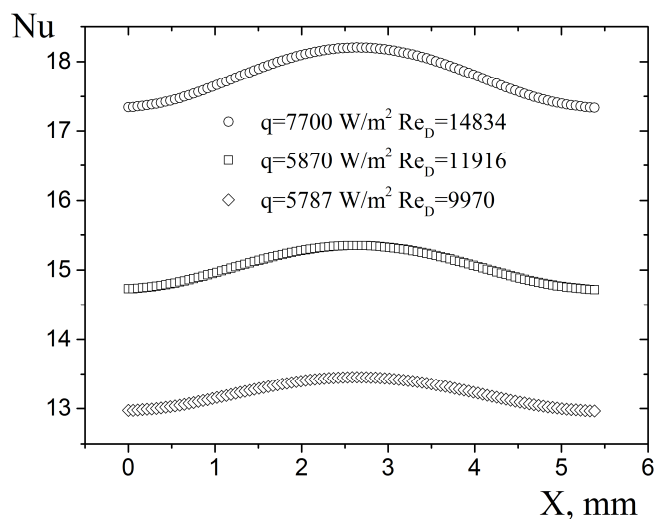


Рис. 4. Распределение локального числа Нуссельта по боковой стороне канала в сечении  $X / L = 0.824$  от входа в канал.

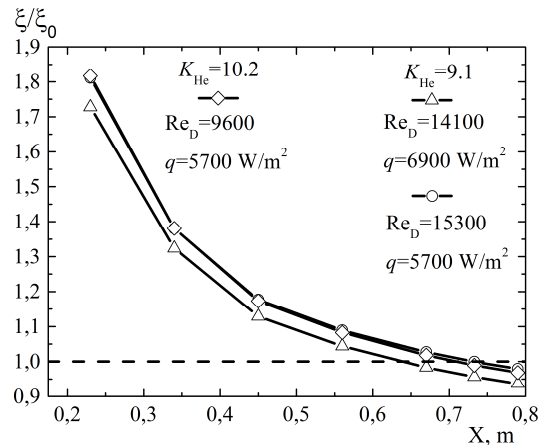


Рис. 5. Средний приведённый коэффициент гидравлического сопротивления канала.

Подвод тепла через стенки канала увеличивает температуру рабочей смеси (рис. 6). Как видно, распределение среднемассовой температуры по длине канала имеет линейную зависимость, что говорит о тепловой стабилизации, хотя течение гидродинамически не стабилизировано. Тепловая стабилизация достигается из-за низкого значения числа Прандтля газовых смесей ( $Pr \approx 0.2$ ). При таких числах Прандтля толщина теплового пограничного слоя больше толщины динамического. Тепловые пограничные слои сливаются раньше динамических, и достигается тепловая стабилизация потока. Из графика видно, что данные расчёта и эксперимента совпадают с хорошей точностью.

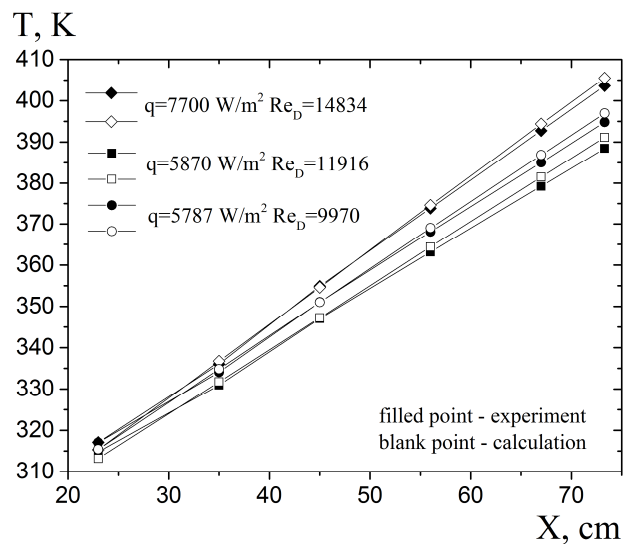


Рис. 6. Распределение среднемассовой температуры на внешней стенке канала по длине канала при течении гелий (9,1%)-ксеноновой смеси.

На рис. 7 представлена зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса, построенного по гидравлическому диаметру. Закрашенными значками обозначены экспериментальные данные, полыми - расчётные значения. Линия 1 - формула Михеева:

$$Nu = 0.021 \cdot Re_D^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \quad (1)$$

Линия 2 - число Нуссельта для треугольной упаковки стержней:

$$Nu = \left( 0.0165 + 0.02 \left( 1 - \frac{0.91}{(s/d)^2} \right) \cdot (s/d)^{0.15} \right) \cdot Re_D^{0.8} \cdot Pr^{0.4}, (2)$$

здесь  $s$  - шаг расположения ТВЭлов,  $d$  - диаметр ТВЭла.

Линия 3 - зависимость для числа Нуссельта из работы [Киров В.С., Кожелупенко Ю.Д., Тетельбаум С.Д. К вопросу об определении коэффициента теплообмена смесей газов с гелием и водородом // ИФЖ. 1974. Т. XXVI. №2. С.226-228.]:

$$Nu = 0.022 \cdot Re_D^{0.8} \cdot Pr^k \quad (3)$$

здесь показатель степени  $k = 0.595 \cdot Pr^{-0.126}$ .

Из графика видно, что экспериментальные и расчётные данные для треугольного канала в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса можно описать эмпирическими зависимостями, предложенными для каналов круглого сечения, несмотря на то, что течение в канале гидродинамически неразвито. Формула Михеева завышает значения чисел Нуссельта. Эмпирическая зависимость, предложенная для тепловыделяющих элементов, расположенных в треугольной упаковке даёт завышенное примерно на 15% среднее значение числа Нуссельта.

Формула из работы [Киров В.С., и др.] хорошо обобщает полученные экспериментальные и расчётные данные, несмотря на то, что рекомендованный для этой формулы диапазон чисел Прандтля  $Pr = 0.3 - 1$ , следовательно диапазон работы данной формулы можно расширить до чисел Прандтля равных  $Pr=0.2$ .

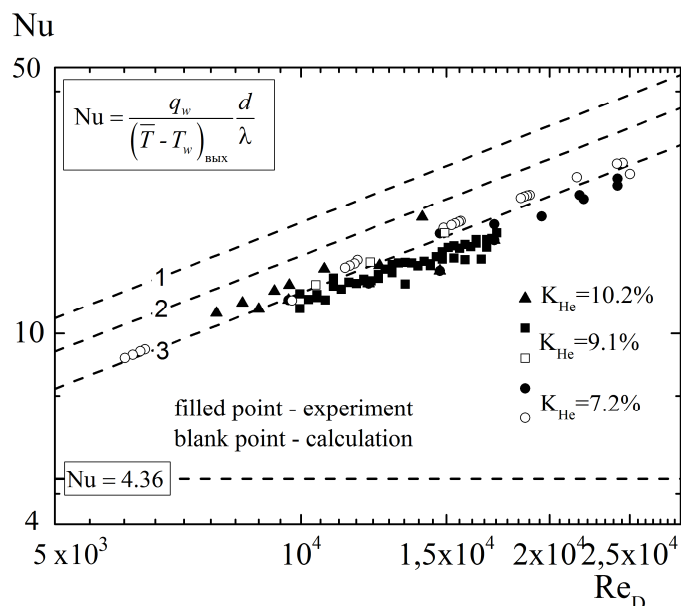


Рис. 7. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса



### **Эффект от использования кластера в достижении целей работы:**

Доступ к кластеру ИВЦ НГУ позволил использовать достаточно мелкие расчётные сетки, а следовательно позволил получить большую точность расчёта теплообмена в каналах со сложной формой поперечного сечения. Распараллеливание расчёта средствами ANSYS FLUENT позволило сократить время расчёта по сравнению с однопоточным случаем.

### **Список публикаций:**

1. **О.В. Витовский, С.Л. Елистратов, М.С. Макаров, В.С. Наумкин, А.А. Дунайцев, Д.Д. Ким, Д.В. Мариничев.** Теплообмен в потоке гелий-ксеноновой смеси внутри канала треугольного поперечного сечения. Доклады шестой российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ - 6) 27-31 октября 2014 г.

2. **М.С. Макаров, В.С. Наумкин.** О влиянии дистанцирующей навивки на газодинамику и теплообмен в ТВС с газовым теплоносителем. Доклады шестой российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ - 6) 27-31 октября 2014 г.

3. **М.С. Макаров, В.С. Наумкин.** Численное исследование теплообмена в модели ТВС реактора с гелий-ксеноновым теплоносителем. - Тезисы докладов всероссийской конференции XXXI Сибирский теплофизический семинар, 17-19 ноября 2014. Новосибирск. - с. 38.

4. **О.В. Витовский, С.Л. Елистратов, М.С. Макаров, В.Е. Накоряков, В.С. Наумкин.** Теплообмен в потоке газовой смеси с низким числом Прандтля внутри канала треугольного поперечного сечения. Journal of Engineering Thermophysics (подана в печать).

5. **М.С. Макаров, В.С. Наумкин.** Сопротивление каналов со сложной формой поперечного сечения. Тезисы докладов XXXII Сибирского теплофизического семинара. (поданы в печать).

**Впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также предложения по их совершенствованию.**

В целом впечатление положительное. Из плюсов работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ можно выделить: достаточно удобный доступ, интересные семинары по работе вычислительных систем и суперкомпьютеров и программному обеспечению.