

Модификация критерия подобия электрической конвекции

© К.В. Алтунин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ, г. Казань, 420111, Россия

Рассмотрена модификация полученного ранее критерия подобия электрической конвекции, который зависит от создаваемого напряжения на электродах, расстояния между ними и удельного электрического сопротивления рабочей среды (жидкого углеводородного горючего). В модифицированное число подобия входят разность температур стенки и теплоносителя, а также коэффициент теплоотдачи для условий конвекции без применения электрических полей. Представлен анализ новой версии числа подобия электроконвекции, позволяющий утверждать, что его можно эффективно применять наравне с ранее полученным критерием подобия. Приведены результаты исследований с жидким углеводородным горючим — керосином марки ТС-1 при естественной и вынужденной конвекции. Показаны результаты сравнения применения чисел подобия электрической конвекции, построены новые графики и получены критериальные зависимости.

Ключевые слова: электрическая конвекция, число подобия, критериальное уравнение, керосин

Введение. Электрической конвекцией принято называть макроскопическое движение жидкостей и газов под воздействием внешнего электрического поля [1]. Источник электроконвекции — неоднородность среды по таким электрическим параметрам, как диэлектрическая проницаемость, электропроводность, плотность объемных зарядов [2, 3]. По сравнению с так называемыми традиционными способами электроконвективные способы интенсификации теплообмена обладают следующими преимуществами:

меньшие площади поверхностей теплообмена, габариты и масса теплообменной аппаратуры;

применены легко регулируемые и управляемые источники электрического напряжения;

требуются меньшие затраты электрической мощности для получения сравнимого по абсолютной величине эффекта интенсификации теплоотдачи в случае наложения электрических полей [4, 5].

Несмотря на многолетний интерес к рассматриваемой проблеме, до сих пор было проведено не так много исследований электроконвекции в среде жидких углеводородных горючих (УВГ) и углеводородных охладителей (УВО).

Цель работы — модификация полученного ранее критерия подобия электрической конвекции.

Экспериментальная установка и рабочий участок. Для исследования особенностей процессов теплоотдачи в условиях естественной конвекции в жидких УВГ и УВО была использована экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1. Установка состоит из бомбы постоянного давления 7, системы поддержания избыточного давления и других элементов. Бомба создана для проведения экспериментов при до- и сверхкритических значениях давления и температуры. Сверху установлена крышка 12, в которую вмонтированы два медных токоввода 11, 14 с изоляционными прокладками 10. К нижним концам токовводов монтируется рабочий участок 15–17. Сменными элементами являются рабочая пластина размером $(60 \times 2 \times 0,2) \times 10^{-3}$ м из нержавеющей стали марки X18H10T и термопара. Через два окна визуализации 5, 18, изготовленных из прозрачного оргстекла толщиной 20×10^{-3} м, ведется наблюдение за процессами теплоотдачи в области рабочего участка.

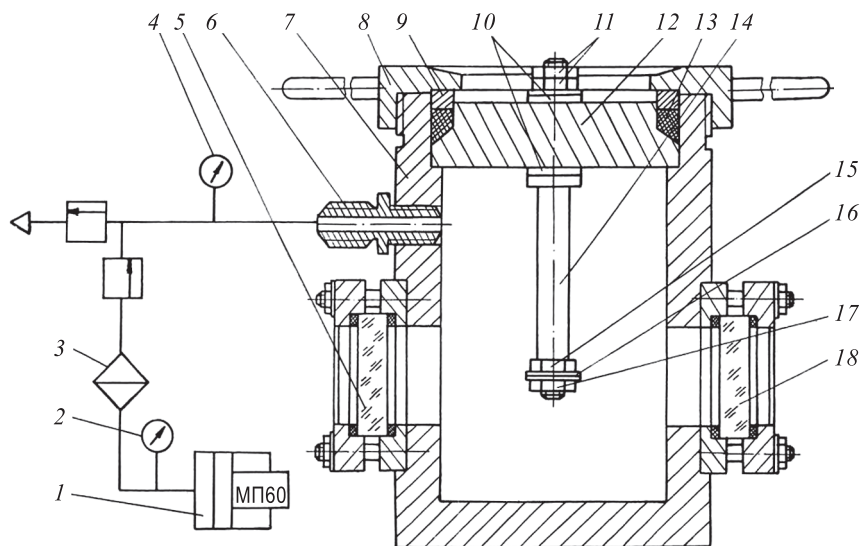


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования особенностей теплоотдачи к жидким углеводородным горючим (углеводородным окислителям) при естественной конвекции

Исследуемый охладитель, например керосин ТС-1, наливают в полость бомбы 7 и закрывают крышкой 8 с резиновым уплотнителем 13 и прижимным механическим кольцом 9. Система поддержания избыточного давления состоит из грузопоршневого манометра 1, 2 марки МП-60 и разделителя 3. Давление в бомбе определяется по манометру 4, устанавливаемому перед входным штуцером 6.

Для создания электростатических полей были разработаны и созданы рабочие участки. Рабочий участок с электростатическими

полями (рис. 2) состоит из постоянных и сменных элементов. К постоянным относятся: крышка 6, в которую вмонтированы через изоляционные прокладки два медных токоввода 5; система контроля за подаваемым напряжением 11, 12; система подачи высоковольтного напряжения 7, 9, 10, 13 для создания электростатических полей на рабочем участке; система контроля за изменением температуры 8 рабочей пластины 1.

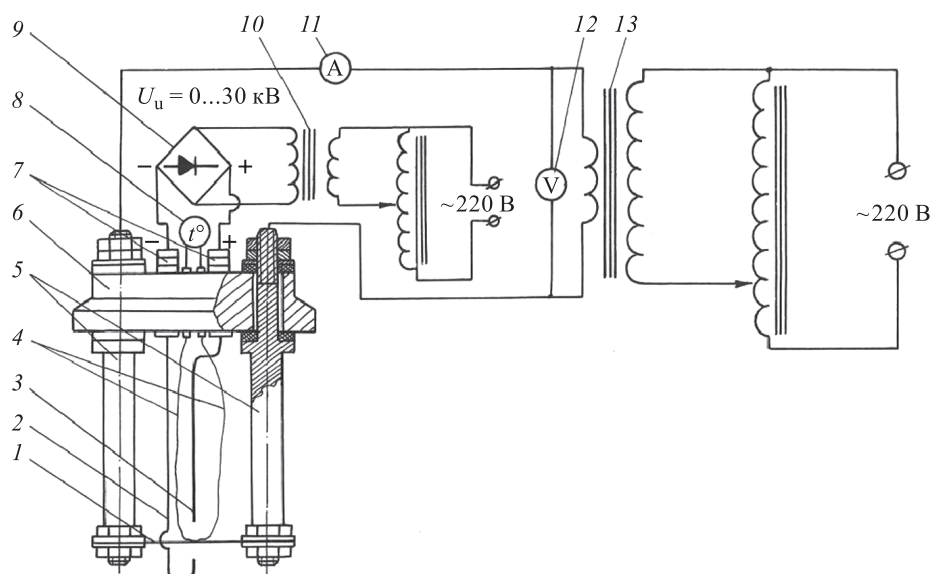


Рис. 2. Схема рабочего участка с электростатическими полями

К сменным элементам рабочего участка относятся рабочая пластина 1 из нержавеющей стали марки X18H10T размерами $(60 \times 2 \times 0,2) \times 10^{-3}$ м, закрепленная в нижней части токовводов 5; термопара 4, изготовленная из хромель-алюмелевых проволок диаметром $0,08 \times 10^{-3}$ м, приваренная к центру рабочей пластины 1 и выведенная через изоляционные прокладки в крышке 6 к потенциометру 8; рабочие элементы 2, 3 (в данном случае — две соосные иглы из нержавеющей проволоки диаметром $1,2 \times 10^{-3}$ м), на которые подается высоковольтное постоянное напряжение в пределах 0...50 кВ для создания различных значений напряженности электростатических полей; расстояние между иглами h изменяется и фиксируется в пределах $(5...15) \times 10^{-3}$ м. Пробные опыты проводили с различными рабочими элементами, но для основных исследований были выбраны две соосные иглы, так как только с их помощью можно эффективно и детально визуализировать все термодинамические процессы, происходящие в бомбе, и почти без потерь реализовать подаваемую

энергию электростатического поля. Источником создания и регулирования электростатического напряжения в пределах 0...50 кВ служил прибор марки АФ-3.

Для проведения экспериментальных исследований по вынужденной конвекции был использован рабочий участок, представленный на рис. 3, 4. Схема рабочего участка (см. рис. 4) включает экспериментальную трубку 12 из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т длиной 230 мм и диаметром 3 мм; медную заглушку 5; пружину 6 для обеспечения температурного удлинения трубки 12; медную трубку 8; нижний коллектор 2; наружную трубку 9 с внутренним диаметром 5 мм из оргстекла; винт с шайбой крепления 3 медных проволочных токоподводов к нижнему коллектору; верхний коллектор 17; крышку 1; уплотнения 7, 18, 19; токовводы 23, 31; подводящие и отводящие магистрали 4, 16; три стойки 10 с изоляционными шайбами 14 и втулками 13 с крепежными гайками 15; прижимной болт с отверстием 20 для трубки 12; подвижную термопару 21 для наружного теплосъема с системой контроля температуры стенки 22; две соосные иглы с регулировочно-прижимными болтами 11; источник создания и регулирования электростатического напряжения 24, 26, 27 марки АФ-3; систему контроля 25, 28 и регулирования 30, 29 напряжения на трубке 12.

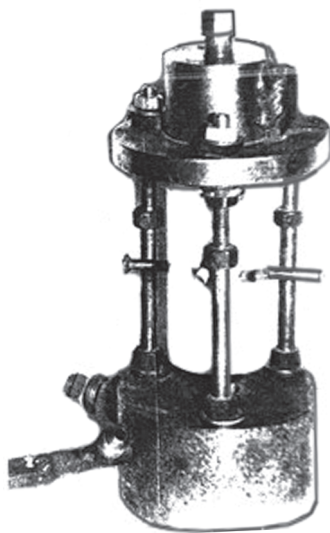


Рис. 3. Общий вид части экспериментальной установки с рабочим участком с электростатическими полями для вынужденной конвекции жидких (газообразных) углеводородных горючих и углеводородных охладителей в кольцевом канале

Для создания потока керосина использовалась насосная система. Применялся поршневой плунжерный насос НП-25-5 с рабочим давлением до 25 МПа, имеющий производительность до 17 л/мин и частоту вращения 2200 об/мин, работающий при температуре рабочей жидкости от -40 до $+80$ °С. Расход керосина через рабочий участок регулировался изменением гидравлического сопротивления пере-

пусковой магистрали с помощью соответствующего вентиля. Рабочая жидкость (керосин) поступала в насос из разгруженного баллона емкостью $30 \times 10^{-3} \text{ м}^3$. В насосную систему входили также фильтры, вентили, баки, включая сливной бак, система охлаждения нагретого ТН, счетчик-расходомер. Характеристики основных датчиков и приборов представлены в табл. 1.

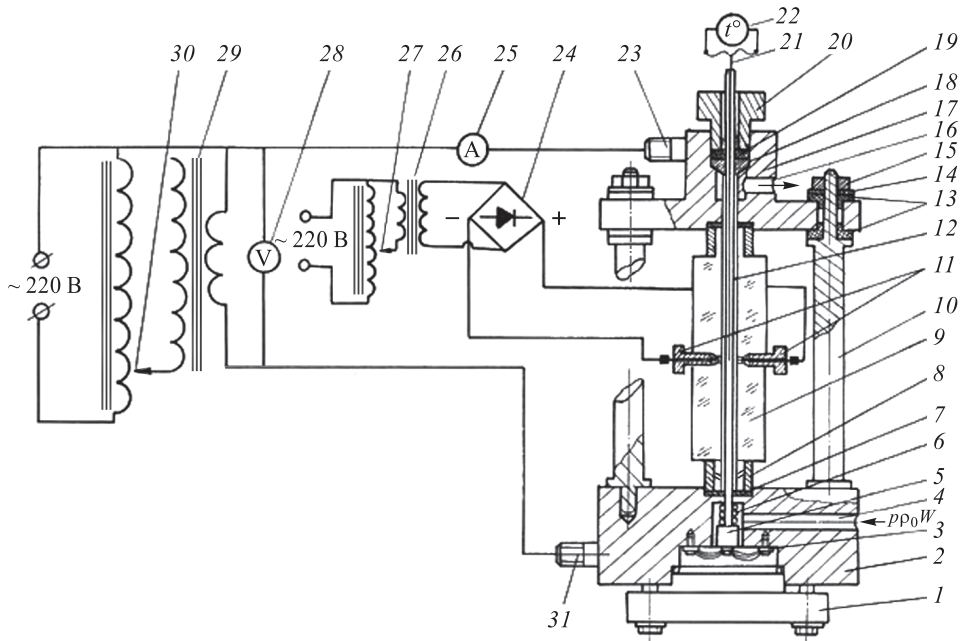


Рис. 4. Схема рабочего участка по вынужденной конвекции жидких углеводородных горючих (углеводородных охладителей) с электростатическими полями в кольцевом коллекторе

Таблица 1

Характеристики основных датчиков и приборов

Измеряемый параметр	Измерительные и регистрирующие приборы	Цена деления/ разрешение	Класс точности	Диапазон измерений
Падение напряжения на пластине $U_{ш}$, В	Вольтметр универсальный	1	0,1	0–100
Сила тока на рабочем участке (на пластине): I , А $I_{ш}$, А	Амперметр	1	0,2	0–100
	Трансформатор тока И56	1	0,1	0–100
Электростатическое напряжение на иглах U , кВ	Регулятор статического напряжения АФ-3	5	0,1	5,0–50

Измеряемый параметр	Измерительные и регистрирующие приборы	Цена деления/ разрешение	Класс точности	Диапазон измерений
Температура рабочей пластины (трубки) t , °С	Термопара ТХА	–	2	–200...+1000
Напряжение на рабочей пластине, мВ	Милливольтметр цифровой Ф-203	1	0,05	0–100
Давление p , кгс/см ²	Манометр образцовый	1	0,4	0–250
Давление (в бомбе) p , Па	Грузопоршневой манометр МП-60	100	0,05	(0–6,0)·10 ⁶
Толщина слоя осадка $\delta_{ос}$, мм	Микроскоп универсальный 200 Carl Zeiss 1600X	–	–	6,2·10 ^{–4} –1
Ширина пластины s , мм	Линейка	1	1	0–150
Диаметр трубки d , мм	Штангенциркуль ШЦ-1	0,1	1	0–150

Число подобия электрической конвекции и критериальные уравнения. Ранее методом анализа размерностей получено число подобия электрической конвекции [6]:

$$Al = \frac{U^2}{h\rho_f q}, \quad (1)$$

где U — напряжение тока (разность потенциалов на электродах), В; h — расстояние между электродами, м; ρ_f — удельное электрическое сопротивление рабочей среды (диэлектрика), Ом·м; q — плотность теплового потока, Вт/м².

Критерий подобия (1) был хорошо апробирован при обобщении результатов экспериментальных исследований по естественной и вынужденной конвекции в среде жидкого углеводородного горючего — керосина марки ТС-1, а значения q были уже заданы и взяты из результатов экспериментов. С использованием (1) были получены два критериальных уравнения.

Первое уравнение — в условиях естественной конвекции керосина ТС-1 [7]:

$$Nu_E = c(Ra Al)^{0,5}, \quad (2)$$

где Nu_E — число Нуссельта при использовании электрических полей (в данном случае — электростатических); c — эмпирический коэффициент; Ra — число Рэлея.

Значения коэффициентов c в (2) изменялись зависимости от условий эксперимента при $p = 0,1 \dots 1,2$ МПа, $q = 140 \dots 680$ кВт/м², $U = 5 \dots 20$ кВ. Значения чисел Ra и Al находились в интервалах $0,61 \cdot 10^{-6} < Al < 277 \cdot 10^{-6}$ и $0,7 < (RaAl) < 8,9$. Полученные значения коэффициента c сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента c , определенные экспериментально с точностью $\pm (4 \dots 30)$ % при естественной конвекции в среде ТС-1

Напряжение U , кВ	Расстояние между иглами-электродами h , мм		
	5	10	15
5	31	48,7	44,5
10	83,6	76,4	61,5
20	49	47,4	36,7

Второе уравнение — в условиях вынужденной конвекции керосина ТС-1 в узком кольцевом канале [8]:

$$Nu_E = cRe^{0,55} Pr^{1,08} Al^{0,03}, \quad (3)$$

где $c = 0,07$ при $q < 9 \cdot 10^5$ Вт/м², $c = 0,17$ при $q > 9 \cdot 10^5$ Вт/м²; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля.

Точность определения Nu_E по (3) составила $\pm (2 \dots 12)$ % (расхождение между экспериментальными и теоретическими данными по формуле расчета числа Нуссельта). Расчет выполнялся для давления $p = 0,1 \dots 3,0$ МПа, скорости прокачки $W = 1 \dots 5,6$ м/с, числе Рейнольдса $Re = 3000 \dots 21\,000$, $Al = (0,58 \dots 150) \cdot 10^{-6}$.

Во всех экспериментах применяли одну пару игл-электродов, между которыми были установлены пластина из стали (при естественной конвекции) и трубка из стали (при вынужденной конвекции). За определяющую температуру была выбрана средняя температура керосина T_m , за характерный размер при естественной конвекции — ширина металлической пластины $s = 2$ мм, при вынужденной конвекции — гидравлический диаметр кольцевого канала $d_h = 2$ мм.

Модификация числа подобия электрической конвекции. Следует отметить, что число подобия (1) имеет ограниченное применение, оно может быть использовано, если известна плотность теплового потока q . На основе (1) было получено модифицированное число подобия электроконвекции:

$$Al = \frac{U^2}{h\rho_f\alpha_0\Delta t}, \quad (4)$$

где α_0 — коэффициент теплоотдачи без электрической конвекции, Вт/(м²·К); $\Delta t = t_w - t_f$, °С (t_w — температура стенки, °С; t_f — температура теплоносителя, °С).

В (4) входит коэффициент α_0 , который можно рассчитать по одной из формул для определения конвективной теплоотдачи [9–11]:

– с нагретой поверхности горизонтальной стенки при $5 \cdot 10^2 < Ra < 2 \cdot 10^7$

$$\overline{Nu}_m = 0,54kRa^{1/4}, \quad (5)$$

где \overline{Nu}_m — среднее значение числа Нуссельта при средней температуре; $k = 1,3$, если теплоотдача происходит с верхней поверхности, $k = 0,7$, если теплоотдача происходит с нижней поверхности;

– внутри трубки при турбулентном течении и $Re_f > 10^4$:

$$\overline{Nu}_f = 0,023Re_f^{0,8}Pr_f^{1/3}; \quad (6)$$

– внутри трубки при переходном течении и $2300 < Re_f < 10^4$:

$$\overline{Nu}_f = K_0Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где \overline{Nu}_f — среднее значение числа Нуссельта при температуре теплоносителя; K_0 — поправочный коэффициент, $K_0 = f(Re_f)$; Pr_f — число Прандтля при температуре теплоносителя, Pr_w — число Прандтля при температуре стенки.

Таким образом, для того чтобы найти модифицированное число Al по формуле (4), достаточно знать разность потенциалов на электродах, расстояние между электродами, удельное электрическое сопротивление рабочей среды, температуры стенки и теплоносителя, а также коэффициент теплоотдачи без электрической конвекции.

Новые уравнения с модифицированным числом подобия электрической конвекции. Модифицированное число подобия (4) было апробировано для получения двух новых критериальных зависимостей электрической конвекции. Первая — в условиях естественной конвекции керосина ТС-1:

$$Nu_E = c(RaAl)^{0,5}, \quad (8)$$

где c — эмпирический коэффициент.

Коэффициент c изменялся при $p = 0,1 \dots 1,2$ МПа, $q = 140 \dots 680$ кВт/м², $U = 5 \dots 20$ кВ в зависимости от условий эксперимента, значений расстояния между иглами-электродами h и напряже-

ния U . Значения чисел Al и $RaAl$ находились в интервалах: $1,52 \cdot 10^{-6} < Al < 2,63 \cdot 10^{-3}$; $1,44 < (RaAl) < 84,24$. Значения коэффициента c , определенные с точностью $\pm (2 \dots 25) \%$, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента c в зависимости от условий эксперимента при естественной конвекции в среде ТС-1

Напряжение U , кВ	Расстояние между иглами-электродами h , мм		
	5	10	15
5	22,5	28	26
10	22,5	28	26
20	12	17	15

Вторая зависимость — в условиях вынужденной конвекции керосина ТС-1 в узком кольцевом канале и при использовании числа Al по формуле (4) было получено уравнение, полностью совпадающее с уравнением (3), при этом точность расчета составила $\pm (2 \dots 10) \%$.

При выводе уравнения (8) значение коэффициента α_0 было рассчитано по уравнению (5), при выводе уравнения вынужденной конвекции α_0 было подсчитано по уравнениям (6), (7). С учетом наличия антистатической присадки удельная электропроводность ТС-1 при 20°C также была выбрана равной 171 пСм/м .

Сравнение результатов исследований с числами подобия электрической конвекции. Результаты обобщения экспериментальных данных представлены на рис. 5–7. В некоторых случаях применение модифицированного числа подобия (4) позволяет повысить точность расчетов на несколько процентов.

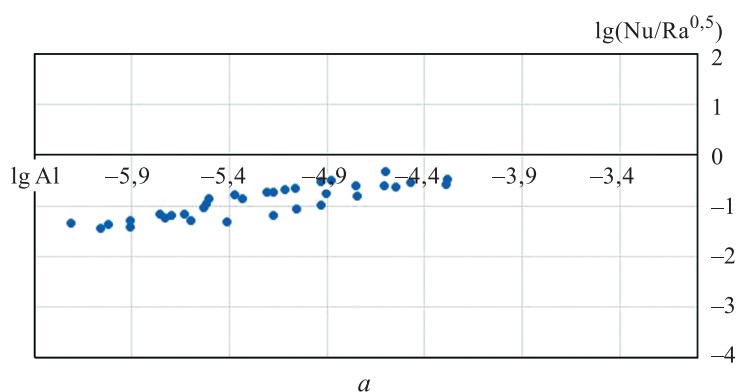


Рис. 5 (начало). Результаты исследований в случае естественной конвекции ТС-1 при $p = 0,1 \dots 1,2 \text{ МПа}$, $q = 140 \dots 680 \text{ кВт/м}^2$, $U = 5 \dots 20 \text{ кВ}$, $h = 5 \dots 15 \text{ мм}$, с числом подобия Al , рассчитанным по формуле (1) (a)

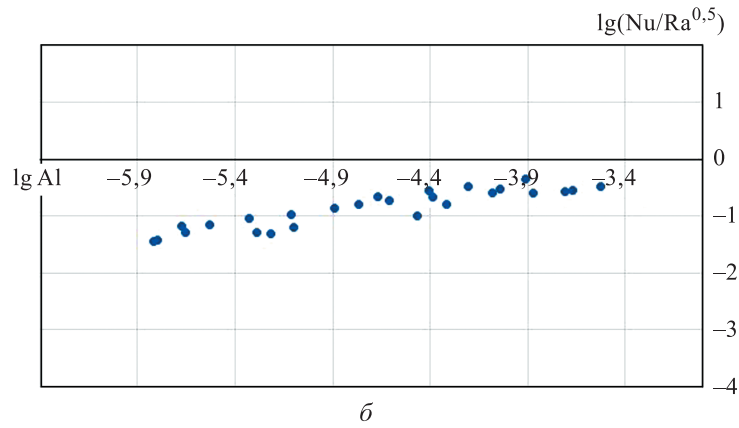


Рис. 5 (окончание). Результаты исследований в случае естественной конвекции ТС-1 при $p = 0,1 \dots 1,2$ МПа, $q = 140 \dots 680$ кВт/м², $U = 5 \dots 20$ кВ, $h = 5 \dots 15$ мм, с числом подобия Al, рассчитанным по формуле (4) (б)

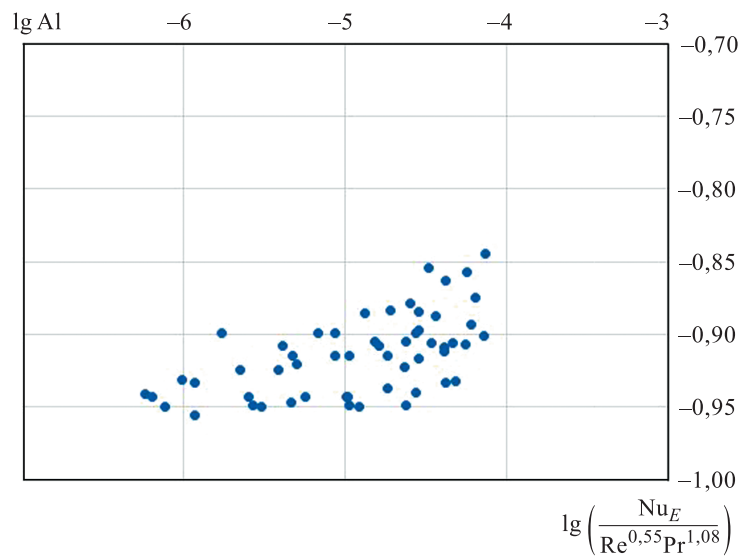


Рис. 6. Результаты исследований при вынужденной конвекции ТС-1 в узком кольцевом канале при $W = 1 \dots 5,6$ м/с, $Re = 3125 \dots 20562$ и рассчитанным по формуле (1) числе $Al = (0,57 \dots 149) \cdot 10^{-6}$

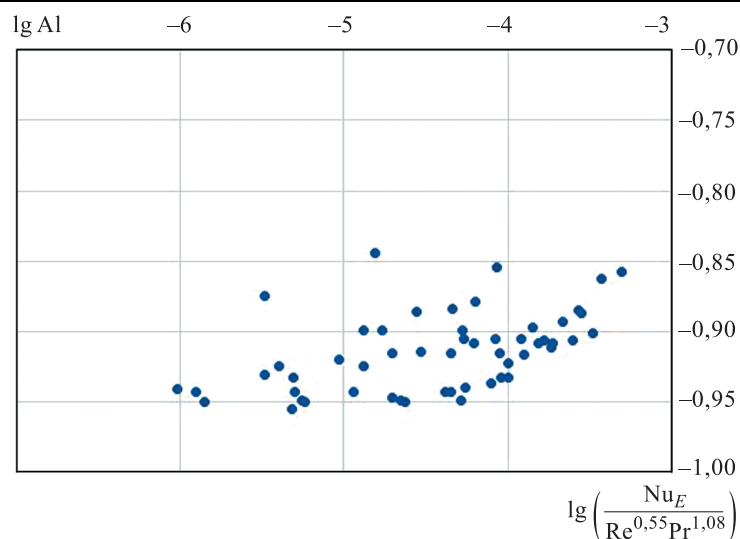


Рис. 7. Результаты исследований при вынужденной конвекции ТС-1 в узком кольцевом канале при $W = 1 \dots 5,6$ м/с, $Re = 3125 \dots 20562$ и рассчитанным по формуле (4) числе $Al = (0,96 \dots 498) \cdot 10^{-6}$

Закключение. Таким образом, получено модифицированное число подобия электрической конвекции, которое может быть успешно применено для расчета числа Нуссельта Nu как при естественной, так и при вынужденной конвекции жидких углеводородных горючих и охладителей. Проведено обобщение в виде уравнений и сравнение результатов исследований, представленных в виде графиков, свидетельствующие об их прямом сходстве. Применение модифицированного числа подобия электроконвекции позволяет повысить точность расчетов. Намечены дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Остроумов Г.А. Электрическая конвекция (обзор). *Инженерно-физический журнал*, 1966, т. 10, № 5, с. 683–695.
- [2] Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Г.А. Остроумов, ред. Кишинев, Изд-во Штиинца, 1977, 320 с.
- [3] Grosu F.P., Bologa M.K., et al. Electroisothermal convection and its role in the process of heat exchange. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 187–194.
- [4] Савиных Б.В., Гумеров Ф.М. *Свойства переноса диэлектрических жидкостей и тепло-массообмен в электрических полях*. Казань, Изд-во ФЭН, 2002, 384 с.
- [5] Алтунин К.В. Разработка критериального уравнения влияния электростатических полей на теплообмен и осадкообразование в среде керосина при естественной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 1 (109). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2049>

- [6] Алтунин К.В. Разработка критериев подобия электроконвекции в углеводородных средах. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2012, № 1–2, с. 168–171.
- [7] Алтунин К.В. Исследование влияния электростатических полей на теплоотдачу при естественной конвекции керосина. *Тепловые процессы в технике*, 2020, т. 12, № 9, с. 403–410.
- [8] Алтунин К.В. Разработка критериального уравнения вынужденного движения керосина с новым числом подобия электроконвекции. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2020, № 3, с. 30–33.
- [9] Савин И.К. *Теоретические основы теплотехники (Краткий курс). Ч. II. Теплопередача*. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2008, 172 с.
- [10] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва, Энергия, 1975, 488 с.
- [11] Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Шукин В.К. *Термодинамика и теплопередача*. Изд. 2-е. Москва, Высшая школа, 1975, 495 с.

Статья поступила в редакцию 28.04.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин К.В. Модификация критерия подобия электрической конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 6.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2186>

Алтунин Константин Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения» КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ. Область деятельности и научные интересы: теплообмен, теплоотдача в жидких и газообразных углеводородных горючих; разработка новых изобретений (полезных моделей) в сфере теплообмена, транспорта, спорта. e-mail: altkonst881@yandex.ru

Modification of the similarity criterion for electric convection

© K.V. Altunin

Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, 420111, Russia

The paper is devoted to the modification of the previously obtained similarity criterion for electric convection. The criterion depends on the voltage generated at the electrodes, the distance between the electrodes, and the specific electrical resistance of the working medium (liquid hydrocarbon fuel). The modified similarity number includes the temperature difference between the wall and the coolant, as well as the heat transfer coefficient for convection conditions without the use of electric fields. The analysis of the new version of the similarity number of electric convection brings us to the conclusion that the number can be effectively used along with the previously obtained similarity criterion. The paper introduces the results of studies with liquid hydrocarbon fuel TS-1 kerosene under natural and forced convection. Electric convection similarity numbers are compared, new graphs are constructed, and criterion dependences are obtained.

Keywords: *electric convection, similarity number, criterion equation, kerosene*

REFERENCES

- [1] Ostroumov G.A. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1966, vol. 10, no. 5, pp. 683–695.
- [2] Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. *Elektrokonvektsiya i teploobmen* [Electroconvection and heat transfer]. G.A. Ostroumov, ed. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1977, 320 p.
- [3] Grosu F.P., Bologa M.K., et al. Electroisothermal convection and its role in the process of heat exchange. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 187–194.
- [4] Savinykh B.V., Gumerov F.M. *Svoystva perenosy dielektricheskikh zhidkostey i teplo-massoobmen v elektricheskikh polyakh* [Transfer properties of dielectric liquids and heat and mass transfer in electric fields]. Kazan, Fen Publ., 2002, 384 p.
- [5] Altunin K.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, no. 1 (109).
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2049>
- [6] Altunin K.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki — Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2012, no. 1–2, pp. 168–171.
- [7] Altunin K.V. *Teplovy protsessy v tekhnike (Thermal processes in technology)*, 2020, vol. 12, no. 9, pp. 403–410.
- [8] Altunin K.V. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva (KAI Bulletin)*, 2020, no. 3, pp. 30–33.
- [9] Savin I.K. *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki (Kratkiy kurs). Ch. II. Teploperedacha* [Theoretical foundations of heat engineering (Short course). Part II. Heat Transfer]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2008, 172 p.
- [10] Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. 3rd ed., rev. Moscow, Energiya Publ., 1975, 488 p.

- [11] Bolgarskiy A.V., Mukhachev G.A., Schukin V.K. *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and heat transfer]. 2nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975, 495 p.

Altunin K.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. Research interests: heat transfer, heat transfer in liquid and gaseous hydrocarbon fuels; development of new inventions (utility models) in the field of heat transfer, transport, sports. e-mail: altkonst881@yandex.ru