

03.1

## Вихревая интенсификация ламинарного теплообмена на стабилизированном участке канала с двухрядными наклонными канавками при прокачке теплоносителей с различными числами Прандтля

© С.А. Исаев<sup>1,2</sup>, Е.А. Никущенко<sup>1</sup>, Д.В. Никущенко<sup>1</sup>, Н.С. Душин<sup>3</sup>, А.Г. Судаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2024 г.

В окончательной редакции 11 июля 2024 г.

Принято к публикации 11 июля 2024 г.

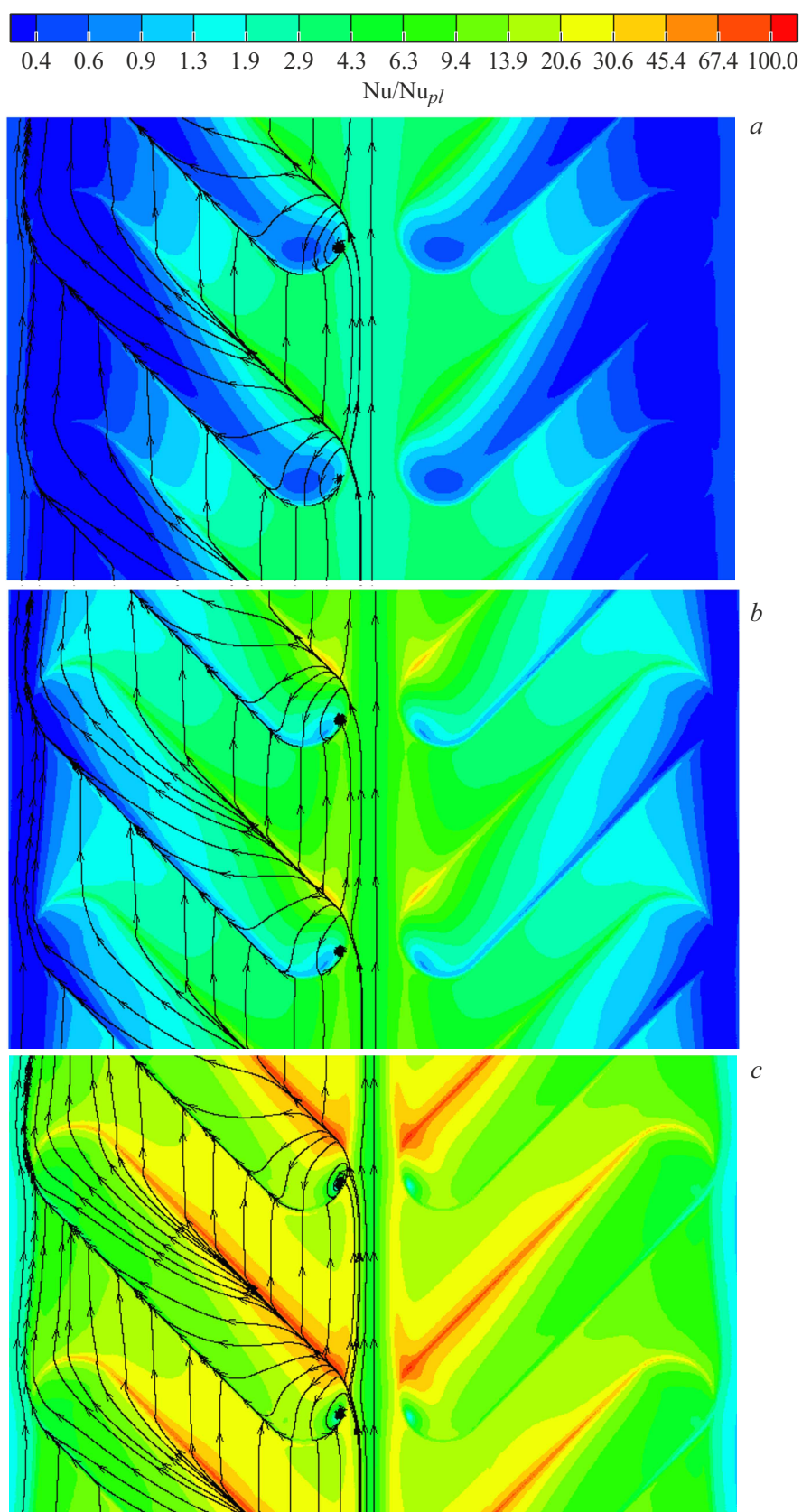
Показано, что утончение с ростом чисел Прандтля пристеночных температурных слоев вблизи стенки канала с двухрядными наклонными канавками на стабилизированном участке движения теплоносителя позволяет значительно интенсифицировать теплообмен для масляных сред. Обнаружено увеличение относительной теплоотдачи для масла марки М20 в 44 раза и для трансформаторного масла в 17 раз (в сравнении с почти четырехкратным и полуторакратным ростом для воды и воздуха).

**Ключевые слова:** отрывное течение, теплообмен, узкий канал, наклонная канавка, интенсификация, численное моделирование, инертный газ, воздух, вода, трансформаторное масло, масло М20.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58954.20033

Луночные технологии, ориентированные на вихревую интенсификацию теплообмена в каналах при умеренном росте гидравлических потерь, активно используются в широком спектре теплоэнергетики [1,2]. Также отмечается интерес к ним в микроэлектронике [3–5]. И совсем незначительное число исследований посвящено влиянию на интенсификацию ламинарного теплообмена числа Прандтля. В частности, в обзоре [2] упоминаются работы [6,7], в которых рассматривается течение трансформаторного масла в миниканале с однорядным пакетом сферических и овальных лунок на нагретой стенке. Обнаружено, что нанесение на нагретую до 30°C стенку девятисекционного миниканала (шириной 2 и высотой 0.5 в долях высоты канала) сферических лунок умеренной глубины (0.2) с шагом 1.5 при низкоскоростном (число Рейнольдса  $Re = 308$ ) течении трансформаторного масла способствует вихревой интенсификации теплообмена и увеличивает теплоотдачу от стенки примерно в 2.5 раза по сравнению со случаем гладкого канала при 7% снижении гидравлических потерь. Предложенные альтернативные формы овальных лунок, имеющих равную со сферическими аналогами площадь пятна (ширина 0.55 и длина 1.5 в долях диаметра пятна базовой лунки) и ту же глубину, позволяют увеличить теплоотдачу еще в 3.4 раза (т.е. в сумме в 8.5 раз) при уменьшении гидравлических потерь по сравнению со случаем гладкого канала на 2.1%. В работе [8] открыто локальное ускорение ламинарного потока воздуха на стабилизированном участке в канале

с редким пакетом однорядных наклонных канавок. В формирующемся сдвиговом потоке максимум продольной скорости почти в 1.5 раза превышает максимальную скорость потока в плоскопараллельном канале. Несколько позже было установлено, что тепловая эффективность, определяемая относительным суммарным осредненным по омываемой поверхности участка с наклонной канавкой числом Нуссельта, имеет максимум порядка 1.8 при глубине 0.3125 от высоты канала, а максимальная теплогидравлическая эффективность реализуется при глубине 0.25 в долях высоты канала и составляет 1.3. В работе [9] установлено локальное ускорение турбулентного воздушного потока для плотного расположения наклонных канавок. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на стенках каналов и пластинах анализируется в обзоре [10]. В частности, измеренные поля скорости ламинарного и турбулентного воздушного потока в канале с 26 двухрядными наклонными канавками сравниваются с численными прогнозами, полученными на цифровом аналоге экспериментального стенда КазНЦ РАН. В настоящей работе проведено сравнение тепловой эффективности и гидравлических потерь указанных каналов с двухрядными наклонными канавками при прокачке разных теплоносителей (масла М20, трансформаторного масла, воды, воздуха, инертного газа), различающихся числами Прандтля, при низких числах Рейнольдса  $Re = 308$ , как в работах [6,7].



**Рис. 1.** Сравнение относительных чисел Нуссельта  $Nu/Nu_{pl}$  с нанесенными картинками растекания на нагретой поверхности канала с плотным пакетом двухрядных канавок на стабилизированном участке для воздушного (*a*), водного (*b*) и масляного (*c*) теплоносителей.

Рассматривается цифровой аналог экспериментального стенда КазНЦ РАН с узким плоскопараллельным каналом, на нижнюю стенку которого нанесены два ряда плотнорасположенных канавок глубиной 0.25 под углами наклона  $\pm 45^\circ$  к ламинарному потоку [10]. В качестве характерных масштабов нормирования выбраны высота канала и среднemasсовая скорость потока в канале. Безразмерные ширина и длина периодической секции канала составляют 10 и 5.06. Центр декартовых координат (продольной  $x$ , вертикальной  $y$  и поперечной  $z$ ) располагается в середине входного поперечного сечения участка с канавками. Соответствующие декартовы составляющие скорости ламинарного течения обозначаются как  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . Внутри каждой канавки вводится связанная система координат  $s$ ,  $y$ ,  $t$ , ориентированных в срединном продольном сечении, вертикальном направлении и поперечном срединном сечении. Двухрядные канавки шириной 1, состоящие из двух половин сферической лунки глубиной 0.25 и соединяющей их цилиндрической траншеи длиной 3.5, ориентированы таким образом (углы наклона  $\pm 45^\circ$ ), чтобы их входные сферические сегменты располагались в средней части канала. Шаг между центрами канавок в плотном пакете выбран равным 2.53 в соответствии с данными работы [9], а радиус скругления кромок канавок принимается равным 0.025.

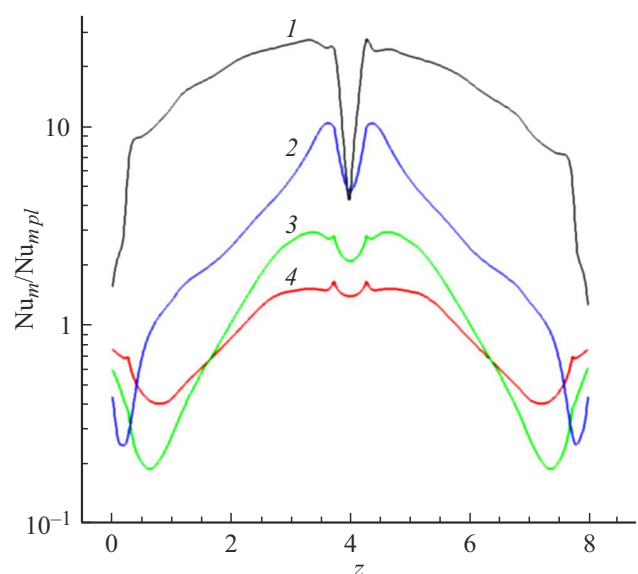
Для описания стационарного ламинарного течения вязкой жидкости при  $Re = 308$  в канале со структурированной стенкой используется система стационарных уравнений Навье–Стокса. Конвективный теплообмен описывается уравнением энергии. На проточных границах секции канала задаются периодические граничные условия для всех зависимых характеристик. Условие прилипания выполняется на стенках канала. Верхняя плоская стенка канала поддерживается при комнатной температуре  $20^\circ\text{C}$  (293 К), которая выбирается в качестве характерной (безразмерная  $T = 1$ ). Температура нижней структурированной стенки принимается изотермической и равной  $30^\circ\text{C}$  (303 К), т.е. безразмерная температура  $T = 1.034$ . Боковые стенки канала теплоизолированные.

Для сред с постоянными физическими свойствами, вязкость и теплопроводность которых не зависят от температуры, решение тепловой задачи рассматривается отдельно от динамической с использованием рассчитанных ранее полей скорости. Физические свойства неоднородной среды типа масла (трансформаторное масло или масло марки М20) задаются в табличном виде и определяются в поле течения с помощью интерполяции, как это делается в работе [11]. При этом уравнение энергии решается совместно с уравнениями движения среды и учитывается влияние температурного поля на характеристики течения. Число Прандтля для воды принимается равным 7, для воздуха и инертного газа (гелий-ксеноновой смеси) — 0.7 и 0.2 соответственно, а в случае движения масляного теплоносителя варьируется в широких пределах от нескольких сотен до десятков тысяч.

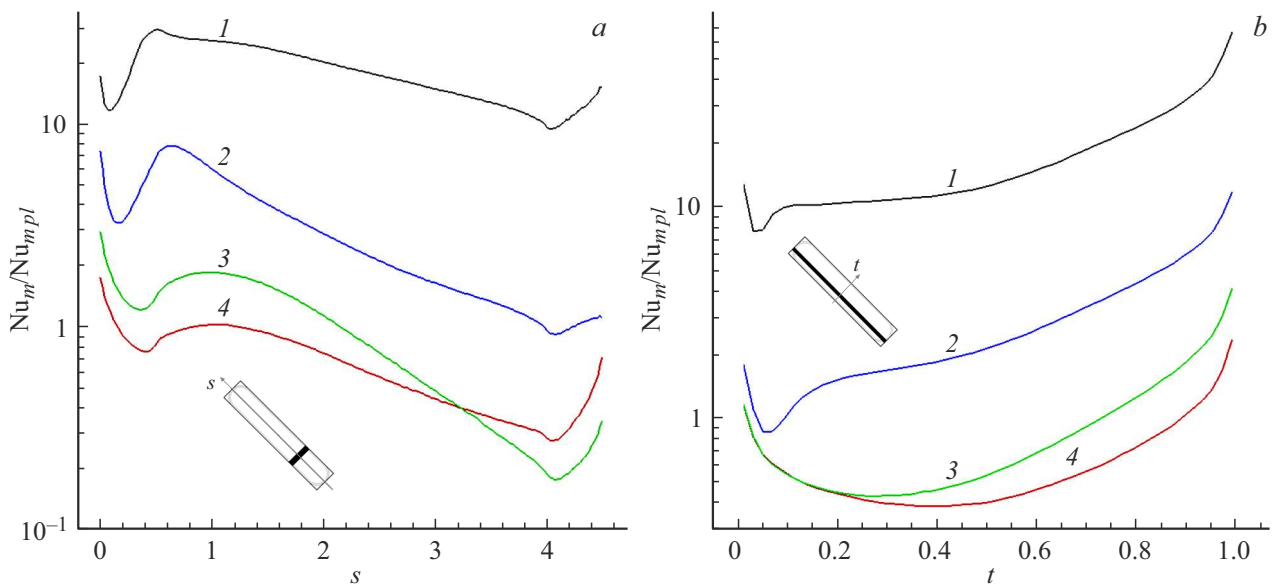
Многоблочная сетка строится на основе разномастных фрагментов структурированных сеток [12]. Шаги у стенки равны  $2.5 \cdot 10^{-4}$ . Сетка содержит 5.7 млн расчетных ячеек.

Численное моделирование отрывного течения вязких сред и конвективного теплообмена проводится с помощью многоблочных вычислительных технологий [12]. Верификация расчетной методологии выполняется при решении задачи конвективного теплообмена в пакете круглых труб при прокачке через него масляного теплоносителя [11]. Численные прогнозы по интегральным теплогидравлическим характеристикам хорошо согласуются с экспериментальными данными Жукаускаса [13].

Процесс решения задачи итерационный. На каждом итерационном шаге решается уравнение поправки давления и рассчитываются поля декартовых составляющих скорости, давления и температуры. Вычислительный процесс заканчивается при достижении максимальных погрешностей зависимых переменных уровня  $10^{-5}$  и выходе на стабилизацию экстремальных локальных и интегральных параметров, включая коэффициент гидравлических потерь  $\xi$  и суммарную теплоотдачу на участке с наклонными канавками  $Nu_{mm}$ . В настоящей работе представляются локальные характеристики течения и теплообмена в канале с двухрядными наклонными канавками на стабилизированном участке. В их число входят поля относительной теплоотдачи  $Nu/Nu_{pl}$  и проинтегрированные по поперечным полосам относительные числа Нуссельта  $Nu_m/Nu_{m,pl}$ . Индекс  $pl$  относится к параметрам плоскопараллельного канала, в том числе на нагретой стенке. Коэффициент гидравлических потерь  $\xi$  в канале, в том числе при нанесении на нагретую стенку двухрядных наклонных канавок, определяется по



**Рис. 2.** Сравнение проинтегрированных по продольным полосам участка канала с наклонными канавками распределений относительных чисел Нуссельта  $Nu_m/Nu_{m,pl}(z)$  для трансформаторного масла (1), воды (2), воздуха (3) и инертного газа (4).



**Рис. 3.** Сопоставление проинтегрированных в рамках ограниченного контуром пятна левой канавки прямоугольного участка по поперечным полосам в продольном  $s$  (а) и поперечном  $t$  (б) направлениях относительных чисел Нуссельта  $Nu_m/Nu_{m,pl}$  для трансформаторного масла (1), воды (2), воздуха (3) и инертного газа (4).

Влияние среды теплоносителя на относительные теплоотдачи и гидравлические потери стабилизированного участка канала с двухрядными наклонными канавками и прямоугольного участка, ограниченного контуром наклонной канавки

Среда	$Nu_{mm}/Nu_{mm,pl}$	$\xi/\xi_{pl}$	$Nu_{mmd}/Nu_{mmd,pl}$	$\xi_d/\xi_{d,pl}$
Масло М20	44.4	1.35	45.1	1.41
Трансформаторное масло	17.2	1.26	18.1	1.31
Вода	3.56	1.12	3.12	1.17
Воздух	1.35		0.98	
Инертный газ	0.96		0.67	

методике расчета гидравлических потерь в канале со сферической лункой [12].

В таблице и на рис. 1–3 представлены некоторые из наиболее существенных полученных результатов. Относительные теплоотдачи от контрольного участка канала длиной 5.06 и шириной 8  $Nu_{mm}/Nu_{mm,pl}$  и от прямоугольного участка криволинейной поверхности, внутри которого располагается контур наклонной канавки,  $Nu_{mmd}/Nu_{mmd,pl}$  находятся в центре внимания нашего исследования. Установлено, что вид теплоносителя кардинальным образом влияет на указанные характеристики, причем относительная теплоотдача масляных сред для отмеченных участков (для масла М20 — примерно 44–45, а для трансформаторного масла — 17–18) практически на порядок выше, чем для сред с постоянным  $Pr$ : воды, воздуха и смеси инертных газов (3.56, 3.12; 1.35, 0.98; 0.96, 0.67). Также следует подчеркнуть, что для масел относительная теплоотдача от поверхности участка внутри контура канавки немного выше, чем для контрольного участка канала с

наклонными канавками. Для воды, воздуха и инертных газов относительная теплоотдача от поверхности внутри канавки оказывается заметно ниже, чем от контрольного участка. Относительные гидравлические потери в канале для контрольного участка оказываются примерно на 5% ниже, чем для участка канала с наклонной канавкой. Для масел значения  $\xi/\xi_{pl}$  получились порядка 1.3–1.4, а для рассмотренных сред с  $Pr = const$  они находятся в диапазоне 1.1–1.2. Механизм интенсификации теплообмена в неоднородных средах с высокими числами Прандтля, как отмечается в [3], связан с резким утончением пристеночных температурных слоев.

Представленные на рис. 1 поля  $Nu/Nu_{pl}$  для трансформаторного масла заметно отличаются от аналогичных полей  $Nu/Nu_{pl}$  для воздуха и воды, хотя структуры отрывного обтекания подобны. Следует отметить, что нанесенные картины растекания получены при компьютерной визуализации траекторий жидких частиц в поверхностном слое на криволинейной нагретой стенке канала, расположенном на расстоянии половины присте-

ночного шага —  $10^{-4}$ . Траектории частиц в слое рассчитываются на основе полей декартовых составляющих скорости  $U$  и  $W$ .

Максимальная теплоотдача наблюдается на структурированной стенке в окрестности плоскости симметрии канала (рис. 2) вблизи входных участков наклонных канавок. Осредненные по продольным полосам контрольного участка распределения  $Nu_m/Nu_{m,pl}(z)$  показывают, что максимальные величины для трансформаторного масла достигают 12, а для смеси инертных газов — порядка 1. К боковым стенкам относительная теплоотдача существенно снижается, причем для  $Pr = \text{const}$  возникают зоны с угнетенным теплообменом.

Внутри канавок интенсивность теплообмена падает от входной к концевой части (рис. 3, *a*), однако для трансформаторного масла  $Nu_m/Nu_{m,pl}(s)$  превосходит 10, а для воздуха и инертных газов в концевой части оказывается меньше 1. Навстречные стороны канавок являются теплонапряженными (рис. 3, *b*) с достижением максимума  $Nu_m/Nu_{m,pl}(t) = 16$  для трансформаторного масла.

### Финансирование работы

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 22-19-00056 (тестирование) и 23-19-00083 (расчеты)).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] B. Dzyubenko, Yu. Kuzma-Kichta, A. Leontiev, I. Fedik, L. Kholpanov, *Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales* (Begell House, 2016).
- [2] S. Rashidi, F. Hormozi, B. Sunden, O. Mahian, *Appl. Energy*, **259**, 1491 (2019). DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.168
- [3] X.J. Wei, Y.K. Joshi, P.M. Ligrani, *J. Electron. Packaging*, **129** (1), 63 (2007). DOI: 10.1115/1.2429711
- [4] J. Zhang, Y.K. Joshi, W. Tao, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **111**, 484 (2017). DOI: 10.1016/J.ijheatmasstransfer.2017.03.036
- [5] G. Lu, X. Zhai, *Int. J. Therm. Sci.*, **145**, 105986 (2019). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.105986
- [6] S.A. Isaev, A.I. Leontiev, Yu.V. Zhukova, P.A. Baranov, M.A. Gotovskii, A.E. Usachov, *Heat Trans. Res.*, **42** (7), 613 (2011). DOI: 10.1615/HeatTransRes.v42.i7.20
- [7] С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, М.А. Готовский, А.Е. Усачов, Ю.В. Жукова, *ТВТ*, **51** (6), 884 (2013). DOI: 10.7868/S0040364413050098 [S.A. Isaev, A.I. Leontiev, M.A. Gotovskii, A.E. Usachov, Yu.V. Zhukova, *High Temp.*, **51** (6), 804 (2013). DOI: 10.1134/S0018151X1305009X].
- [8] С.А. Исаев, П.А. Баранов, А.И. Леонтьев, И.А. Попов, *Письма в ЖТФ*, **44** (9), 73 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.09.46068.17066 [S.A. Isaev, P.A. Baranov, A.I. Leontiev, I.A. Popov, *Tech. Phys. Lett.*, **44** (5), 398 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018050061].
- [9] S.A. Isaev, M.S. Gritckevich, A.I. Leontiev, O.O. Milman, D.V. Nikushchenko, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **145**, 118737 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118737
- [10] S.A. Isaev, *Fluid Dyn.*, **57** (5), 558 (2022). DOI: 10.1134/S0015462822050081
- [11] S.A. Isaev, Yu.V. Zhukova, D.A. Malyshev, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **88** (4), 885 (2015). DOI: 10.1007/s10891-015-1264-9
- [12] S.A. Isaev, P.A. Baranov, A.E. Usachov, *Multi-block computing technologies in the VP2/3 package for aerothermodynamics* (LAP Lambert Academic, Saarbrücken, 2013).
- [13] A. Zhukauskas, V. Makaryavichyus, A. Shlanchyauskas, *Heat transfer of tube bundles in a liquid crossflow* (Mintis, Vilnius, 1968).