

## Микроканальный щелевой теплообменник

© Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, С.И. Каськов

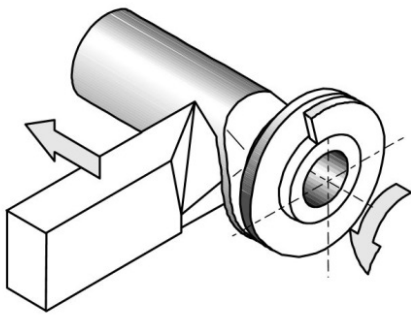
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Предложена оригинальная конструкция компактного теплообменника, в которой реализован принцип параллельного течения теплообменной среды по множеству параллельных щелевых каналов. Теплообменный элемент изготовлен в виде двусторонне-оребренной трубы, ребрение выполнено по технологии деформирующего резания. Течение теплоносителей организовано в сотнях межреберных зазоров наружного и внутреннего ребрения по половине длины окружности теплообменного элемента. Приведены результаты испытаний теплообменника на различных режимах его работы. Снимаемая тепловая мощность теплообменника составляет до 7 кВт при коэффициенте теплопередачи  $740 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .*

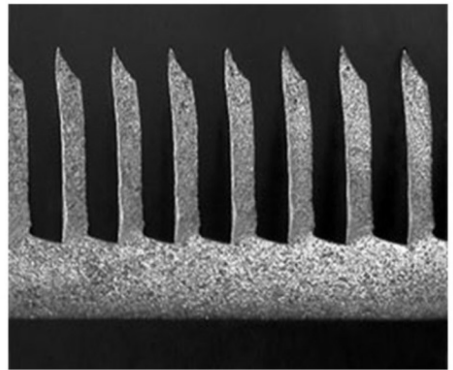
**Ключевые слова:** теплообменник, деформирующее резание, микроканальный, ребреннная труба.

Технико-экономические показатели энергетических установок, систем теплоснабжения и технологических процессов промышленного производства в значительной степени определяются параметрами теплообменных аппаратов. Основная тенденция развития теплосилового оборудования — увеличение их единичной мощности, в результате которого возрастают массогабаритные характеристики теплообменников, входящих в состав установок. Совершенствование теплообменного оборудования в целях уменьшения его размеров, металлоемкости и снижения мощности на прокачку теплоносителей через теплообменник остается актуальным.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод деформирующего резания (ДР) [1]. Он основан на сочетании двух физических процессов — разрушения и целенаправленной пластической деформации материала заготовки. Для традиционной лезвийной обработки разрушение припуска осуществляется по линиям проекции как главной, так и вспомогательной режущих кромок. Инструмент для деформирующего резания имеет геометрические параметры, исключающие разрушение припуска по линии проекции вспомогательной кромки. Таким образом, процесс ДР заключается в подрезании материала поверхностного слоя главной режущей кромкой инструмента и последующей деформации подрезанного слоя его передней поверхностью. Вспомогательная кромка инструмента является не режущей, а деформирующей и определяет окончательное положение подрезанного слоя на заготовке. На поверхности формируется развитый рельеф из совокупности стружек, не отделившихся от заготовки по своей узкой стороне (рис. 1).



а



б

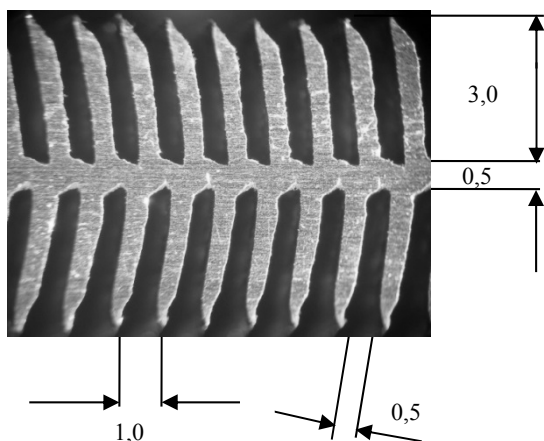
**Рис. 1.** Схема деформирующего резания (а) и поперечный срез полученного оребрения (б)

Метод ДР реализуется на стандартном металлорежущем оборудовании, является безотходным, высокопроизводительным; обработка ведется простым инструментом; смазочно-охлаждающие жидкости для всех материалов, кроме алюминиевых сплавов, не требуются. Метод позволяет управлять всеми характеристиками получаемого макрорельефа путем выбора геометрических параметров инструмента и режимов обработки. Возможно получение межреберных зазоров от 10 мкм и выше, шага оребрения — от 20 мкм до 3 мм. Высота ребер при обработке меди может составлять до семи значений от величины шага. Обработка методом ДР позволяет увеличить площадь поверхности детали до 12 раз. Метод ДР может быть использован при получении развитого макрорельефа на деталях из металлов и сплавов с величиной относительного удлинения не менее 20 % и твердостью не более 230 НВ. В эту группу входят практически все цветные металлы, конструкционные и коррозионно-стойкие стали.

Метод ДР широко используется для оребрения труб теплообменных аппаратов [2], для получения теплообменных структур в виде шипов [3], а также в других областях техники.

Широкие возможности получения теплообменных поверхностей различной макрогеометрии методом ДР позволили предложить оригинальную конструкцию теплообменника со множеством параллельных теплообменных каналов в виде щелей, выполненных на наружной и внутренней поверхностях трубной заготовки [4].

Методом ДР изготовлен теплообменный элемент длиной 200 мм из медной трубы наружным диаметром 55 мм и исходной толщиной стенки трубы 3 мм, причем оребрение было сформировано как на наружной, так и на внутренней поверхностях трубы. Поперечный срез теплообменного элемента показан на рис. 2.

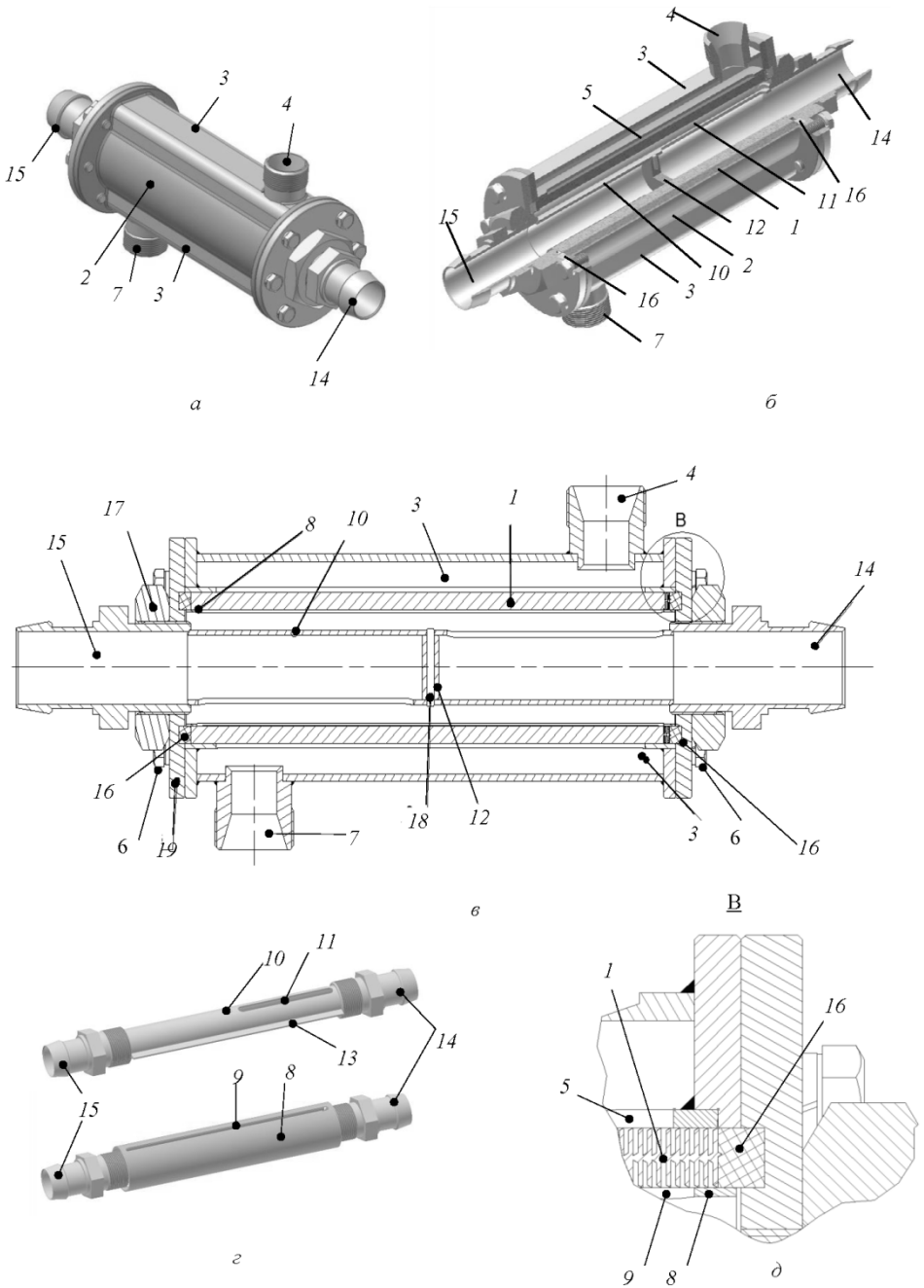


**Рис. 2.** Поперечный срез теплообменного элемента и его характерные размеры (мм)

Упрощенный чертеж щелевого теплообменника представлен на рис. 3. Основой теплообменника является двусторонне-оребренная труба 1, помещенная в цилиндрический корпус 2, имеющий два диаметрально расположенных по диаметру продольных коллектора 3. Один из теплоносителей (например, горячий) поступает через входной штуцер 4 и попадает в продольно расположенный входной коллектор 3. В корпусе 2 напротив коллекторов 3 имеются продольные прорезы 5, что позволяет теплоносителю попасть в межреберный зазор наружного оребрения двусторонне-оребренной трубы 1. Двигаясь по межреберному зазору наружного оребрения по половине длины окружности с обеих сторон двусторонне-оребренной трубы 1, теплоноситель отдает тепло боковым сторонам ребер наружного оребрения и попадает через продольный щелевой зазор корпуса, аналогичный щелевому зазору 5, в сливной коллектор 3, расположенный внизу, и далее в сливной штуцер 7 первого теплоносителя.

Контур второго теплоносителя имеет принцип организации движения, подобный движению теплоносителя в первом контуре. Движение второго теплоносителя по половине длины окружности межреберных зазоров внутреннего оребрения обеспечивается тем, что внутрь двусторонне-оребренной трубы 1 по плотной посадке вставлена цилиндрическая обечайка 8, имеющая продольные пазы 9, расположенные диаметрально.

Внутри обечайки находится труба 10 с двумя диаметрально расположенными на концах трубы продольными окнами 11 и центральной заглушкой 12, фиксируемой штифтом 18. Пространство между трубой 10 и обечайкой 8 разделяют две диаметрально расположенные продольные перегородки 13 (рис. 3, а).



**Рис. 3.** Конструкция щелевого теплообменника:

*a* — внешний вид; *б* — угловой разрез; *в* — осевой разрез; *г* — детали внутреннего коллектора; *д* — участок В осевого сечения

Второй теплоноситель (например, нагреваемый) поступает через входной штуцер *14* и попадает через окно *11* в верхнюю часть пространства между трубой *10* и обечайкой *8*. Далее, через

продольный паз 9 он поступает по всей длине трубы 1 в межреберные зазоры внутреннего оребрения и огибает трубу с двух сторон по половине длины окружности внутреннего оребрения, после чего попадает через нижний паз, аналогичный пазу 9, в нижнюю часть пространства между трубой 10 и обечайкой 8. Из этого межтрубного пространства второй теплоноситель уходит через прорезь, аналогичную прорези 11, в выходной штуцер 15 второго теплоносителя. Тепловой поток от первого теплоносителя, переданный наружному оребрению, передается ребрам внутреннего оребрения и нагревает второй теплоноситель.

Теплообменник имеет также вспомогательные элементы, обеспечивающие его сборку и герметичность, в частности гайки 17 и уплотнительные кольца 16. Фланцы 19 стягиваются винтами 6.

Разработанная конструкция позволяет изготовить теплообменники из различных материалов (медь, алюминий, коррозионно-стойкие стали, титан), рассчитанные на передачу тепловых потоков различной мощности. Совместная работа 400 параллельных щелевых каналов по каждому теплоносителю обеспечивает низкое гидравлическое сопротивление такого теплообменника. Теплообменник может быть использован для охлаждения (нагрева) масла, воздуха, воды и других рабочих сред промышленного оборудования, транспортных машин, аппаратов химического и пищевого машиностроения, конденсации и испарения теплоносителей. Основные технические характеристики теплообменника приведены ниже:

Условный проход штуцеров $d_y$ , мм:	
для охлаждающего контура .....	30
для охлаждаемого контура .....	20
Рабочее давление, МПа .....	До 1,6
Потери давления при расходе воды	
0,4 кг/с, МПа .....	0,01
Габариты теплообменника, мм .....	300×140×60
Масса теплообменника, кг .....	3,8
Масса теплообменного элемента, кг .....	0,27
Материал контуров .....	Медь (возможны алюминий, титан или коррозионно-стойкая сталь)
Размер единичного канала, мм .....	0,5×3,0×65,0
Количество каналов для каждого теплоносителя .....	200 + 200

Произведен расчет коэффициента компактности теплообменника,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ,

$$K_{\text{кп}} = F / V.$$

Площадь  $F$  поверхности теплообмена испытуемого теплообменника принималась равной сумме площадей поверхностей теплообмена внутреннего и внешнего контуров и составляла  $F = 0,48 \text{ м}^2$ . Объем теплообменника (без учета объема, занимаемого присоединительными штуцерами)  $V = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , масса теплообменника в сборе 3,8 кг. Объем теплообменного элемента составляет  $0,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  при его массе 0,27 кг. Таким образом, для разработанной конструкции коэффициент компактности  $K_{\text{кп}} = 500 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , а для теплообменного элемента  $K_{\text{кп}} = 905 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Проведены оценочные испытания теплообменника при различных режимах его работы. Результаты испытаний и расчетные характеристики приведены в таблице. Данные получены для расхода по охлаждающей воде — 0,1 кг/с и по воздуху — 0,025 кг/с [5].

Таблица

**Характеристики теплообменника при различных режимах работы**

Параметр	Режим работы		
	вода — вода	вода — масло	воздух — вода
Коэффициент теплопередачи $k$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )	740	502	133
Снимаемая тепловая мощность $Q_x$ , кВт	7,0	3,1	0,9
Коэффициент использования массы $k_m$ , Вт/(кг·К):			
теплообменник	46	32	8,4
теплообменный элемент по ГОСТу*	655	446	119
по ГОСТу*	203	29,1	19,8
Коэффициент использования объема $k_V$ , кВт/( $\text{м}^3 \cdot \text{К}$ ):			
теплообменник	184	125	33,4
теплообменный элемент по ГОСТу*	334	227	60,5
по ГОСТу*	232	40,7	46,5
* По данным [6, 7].			

Использовались следующие зависимости для расчетов [8].

Расчет коэффициента теплопередачи, Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ),

$$k = \frac{Q_x}{F \Delta t},$$

где  $Q_x$  — тепловая мощность, определенная по расходу холодного теплоносителя, кВт,

$$Q_x = G_x C_p \Delta t_x.$$

Здесь  $G_x$  — расход холодного теплоносителя, кг/с;  $\Delta t_x = t_x'' - t_x'$  — перепад температур между выходной  $t_x''$  и входной  $t_x'$  температурами холодного теплоносителя, К;  $\Delta t$  — средний температурный напор в теплообменнике, К,

$$\Delta t = \frac{\left( (t_r' - t_x'') + (t_r'' - t_x') \right)}{2},$$

где  $t_r'$ ,  $t_r''$  — температуры горячего теплоносителя на входе в теплообменник и на выходе соответственно, К;  $C_p$  — удельная теплоемкость воды, принималась равной 4185 Дж/(кг·К);  $F$  — площадь поверхности теплообмена холодного контура, м<sup>2</sup>.

Расчет коэффициента использования массы, Вт/(м<sup>3</sup>·К):

$$k_m = \frac{Q_x}{m \Delta t},$$

где  $m$  — масса теплообменного элемента или теплообменника.

Расчет коэффициента использования объема, Вт/(м<sup>3</sup>·К):

$$k_V = \frac{Q_x}{V \Delta t},$$

где  $V$  — объем теплообменного элемента или теплообменника.

Как видно по данным таблицы, при всех режимах работы по коэффициентам использования объема и массы предлагаемый теплообменный элемент в 1,4–15,3 раза превосходит существующие теплообменные элементы. Аналогичные коэффициенты для теплообменника в целом в режиме вода — масло превышают показатели для существующих конструкций до 5,5 раза.

Корпус, коллекторы и присоединительные элементы разработанного теплообменника изготовлены из стали, поэтому его массовые характеристики ниже требований ГОСТа. В то же время переход на более легкие металлы или пластики при изготовлении теплообменника приведет к существенному повышению указанных характеристик.

## Выводы

1. На основе возможностей метода деформирующего резания изготовлен теплообменный элемент щелевого типа в виде двусторонне-оребреной трубы. Коэффициент компактности теплообменного элемента составил 905 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, а коэффициенты использования объема и массы выше существующих в 1,4–15,3 раза.

2. Разработана оригинальная конструкция щелевого компактного теплообменника, в которой реализован принцип течения теплообмен-

ной среды по множеству параллельных щелевых каналов, изготовлен опытный образец теплообменника. Коэффициент компактности теплообменника составляет  $500 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

3. Лабораторные испытания разработанного теплообменника подтвердили эффективность его работы. Снимаемая тепловая мощность теплообменника составляет до 7 кВт при коэффициенте теплопередачи  $740 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Коэффициент использования объема теплообменника в режиме вода — масло превышает аналогичный показатель существующих конструкций в 5,5 раз.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Зубков Н.Н., Овчинников А.И. *Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации*. Пат. 2044606 Российская Федерация, 1995, бюл. № 27.

[2] Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев. *Новости теплоснабжения*, 2005, № 4, с. 51–53.

[3] Зубков Н.Н., Трофимович А.С., Овчинников А.И., Цфасман Г.Ю., Городников В.В. Получение штырьковых структур для кипения азота. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 1, с. 100–109.

[4] Зубков Н.Н., Каськов С.И. Компактный теплообменник. Пат. 135401 Российская Федерация, 2013, бюл. № 34.

[5] Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В. и др. *Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования*. Казань, Центр инновационных технологий, 2009, 531 с.

[6] *ГОСТ 13211—80. Охладители кожухотрубчатые водомасляные и водоводяные дизелей и газовых двигателей. Общие технические условия*. Москва, Изд-во стандартов, 1999, 6 с.

[7] *ГОСТ 10598—82. Охладители водовоздушные дизелей и газовых двигателей с наддувом. Общие технические условия*. Москва, Изд-во стандартов, 1999, 6 с.

[8] Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.Л. и др. *Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок*. А.И. Леонтьев, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, 592 с.

Статья поступила в редакцию 26.03.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Каськов С.И. Микроканальный щелевой теплообменник. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1202.html>

**Зубков Николай Николаевич** родился в 1956 г. Д-р техн. наук, профессор, начальник лаборатории НИИ КМ и ТП МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научных трудов — более 100, в том числе 25 изобретений и пять международных патентов. Обладатель шести золотых медалей международных выставок изобретений и инноваций, удостоен Гран-при и кубка Азии за лучшее изобретение 2010 г. Область научных интересов: технология машиностроения, резание материалов, разработка и исследование метода деформирующего резания. e-mail: [zoubkovn@bmstu.ru](mailto:zoubkovn@bmstu.ru)



**Овчинников Александр Иванович** родился в 1955 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных трудов, в том числе 13 изобретений. Область научных интересов: резание материалов, финишные методы обработки, деформирующее резание. e-mail: alex-ai@yandex.ru

**Каськов Сергей Иосифович** родился в 1964 г. Старший преподаватель кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных трудов, в том числе трех изобретений. Область научных интересов: интенсификация теплообмена, теплообменные аппараты, теплофизика энергетических установок и систем, кипение, микроструктурированные поверхности теплообмена. e-mail: kaskov@power.bmstu.ru

## Microchannel heat exchanger

© N.N. Zubkov, A.I. Ovchinnikov, S.I. Kas'kov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper presents an original design of compact heat exchanger which uses principle of parallel agent flow through a variety of parallel slotted channels. Heat transfer element is a both-side finned tube made by deformational cutting method. Coolant flow is organized in hundreds gaps between external and internal fins on a half of length of a circle of a heat exchange element. Tests on various modes have shown heat exchanger capacity up to 7 kW with thermal heat transfer coefficient at 740 W/(m<sup>2</sup>·K).*

**Keywords:** heat exchanger, deformational cutting, microchannel, finned tube.

### REFERENCES

- [1] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. *Sposob polucheniya poverkhnostei s chereduyuschimisya vystupami i vpadinami i instrument dlya ego realizatsii* [Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method]. Patent of the Russian Federation 2044606, 1995, bull. no. 27.
- [2] Zubkov N.N. Heat exchangers tube finning by undercutting and bending surface layers. *Novosti teplosnabzheniya — Heat Supply News*, 2005, no. 4, pp. 51–53.
- [3] Zubkov N.N. Trofimovitch A.S., A.I. Ovchinnikov, Cfasman G.Yu, Gorodnikov V.V. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seria "Mashinostroenie"— Herald of the Bauman Moscow State State Technical University. Mechanical Engineering*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 100–109.
- [4] Zubkov N.N., Kas'kov S.I. *Kompaktnyi teploobmennik* [Compact heat exchanger]. Patent of Russian Federation 135401, 2013, bull. no. 34.
- [5] Gortyshov Yu.F., Popov I.A., Olympiev V.V., et al. *Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivifikatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya* [Thermohydraulic efficiency of perspective ways of intensification of heat transfer in the channels of heat transfer equipment]. Kazan, Innovation technologies Center, 2009, 531 p.
- [6] *GOST 13211—80. Okhladiteli kozhukhotrubchatye vodomashlyanye i vodovodyanye dizelei i gazovykh dvigatelei. Obschie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 13211—80. Shell-and-tube water-oil and water-water coolers for diesel and gas engines. General specifications]. Introduced 1982–01–01. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999, 6 p.
- [7] *GOST 10598—82. Okhladiteli vodovozdushnyye dizelei i gazovykh dvigatelei s nadduvom. Obschie tekhnicheskie usloviya.* [State Standard 10598—82. Water-air coolers for diesel and gas engines with supercharging. General specifications]. Introduced 1983–01–01. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999, 6 p.
- [8] Ivanov V.L., Leont'ev A.I., Manushin E.L., et al. *Tepolobmennyye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchangers and the cooling systems of gas turbine and combined plants]. Moscow, Bauman MGTU Publ., 2003, 592 p.

**Zubkov N.N.**, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Tool Engineering and Technologies Department of Bauman Moscow State Technical University. He specializes in machining and manufacturing engineering and is the developer of a new method of machining deformational cutting. He proposed and justified new methods and devices for obtaining new heat-transfer surfaces, including tube internal enhancement, restoring the original dimensions of worn machine parts by turning, making a capillary porous structures for

heat pipes, making fine filtering meshes from sheets, slotted adjustable filter pipes and surface quenching in lathe machining. He has published more than 120 publications, including 25 inventions, five of which are protected by patents in Europe, the U.S., and other countries. Dr. Zubkov was the recipient of the Gold Medal from the International Exhibition of Invention and Innovation six times. He was also the recipient of the Grand Prix and the Cup of Asia for Best Invention on ITEX, Malaysia, in 2010. e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

**Ovchinnikov A.I.**, Ph.D. (Eng.), assoc, professor of the Tool Engineering and Technologies Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of cutting of materials, finishing methods of treatment, deformational cutting. e-mail: alex-ai@yandex.ru

**Kas'kov S.I.**, Senior Lecturer of the Thermophysics Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 publications, including 3 inventions. Research interests: the intensification of heat transfer, heat exchangers, thermal physics of power plants and systems, boiling, microstructured heat exchange surfaces. e-mail: kaskov@power.bmstu.ru