

## Интенсификация теплообмена в аппаратах гелиевых установок

© А.И. Смородин<sup>1</sup>, И.А. Фролов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup> ОАО «НПО» ГЕЛИЙМАШ», Москва, 115280, Россия

*Для получения статистически однородной структуры теплообменной поверхности в отечественных криогенных гелиевых установках (КГУ) используются витые трубчатые теплообменники из медных труб, оребренных медной проволокой. В такой структуре создаются условия для равномерного распределения потока в межтрубном пространстве теплообменника. Низкое давление прямого потока в КГУ-5000/4,5 и в связи с этим уменьшение коэффициента теплоотдачи в трубном пространстве послужили причинами поиска таких способов интенсификации теплообмена в трубе, при которых не потребуется увеличивать размеры и массу теплообменных аппаратов. Проведенный анализ работ Р. Коха и Э.К. Калинина помог выбрать форму и размеры интенсификаторов в виде плавно очерченных выступов. Исследования четырех экспериментальных теплообменников из оребренных проволокой труб, изготовленных с интенсификаторами и без них, подтвердили, что технологически возможно производство трубчатого витого теплообменника из таких труб с выполненными внутри интенсификаторами в виде плавно очерченных кольцевых выступов. Установлено, что коэффициент теплоотдачи внутри труб будет примерно в 2 раза выше, чем в гладких при сопоставимых условиях. Для размещения таких теплообменников в крупной гелиевой установке удалось уменьшить их массу и габариты.*

**Ключевые слова:** теплообменник, труба, проволочное оребрение, интенсификация теплообмена, коэффициент теплоотдачи, кольцевые выступы-диафрагмы, криогенная гелиевая установка, статистически однородная структура

В современных отечественных криогенных гелиевых установках (КГУ) применяются витые теплообменные аппараты из медных труб, оребренных медной проволокой, с переменными значениями поперечного и продольного шагов (рис. 1). Они обеспечивают статистически однородную структуру теплообменной поверхности. В такой структуре создаются условия для равномерного распределения потока в поперечном сечении теплообменника [1–4]. Компактность теплообменной поверхности для труб диаметром 0,3...10 мм составляет 15 000...5000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> соответственно. Применение этих теплообменников взамен гладкотрубных позволило уменьшить на 45...50 % габариты криогенных гелиевых блоков, входящих в состав установки. Создание крупных КГУ обусловило переход от сжатия гелия в поршневых и винтовых компрессорах к его сжатию турбокомпрессорах. Максимально достигнутое давление в этих компрессорах составило

не более 0,8 МПа. Переход к сжатию гелия в турбокомпрессорах позволил разработать установку КГУ-5000/4,5. При этом возникла проблема уменьшения интенсивности теплообмена со стороны прямого потока внутри труб с соответствующим увеличением габаритов теплообменных аппаратов.

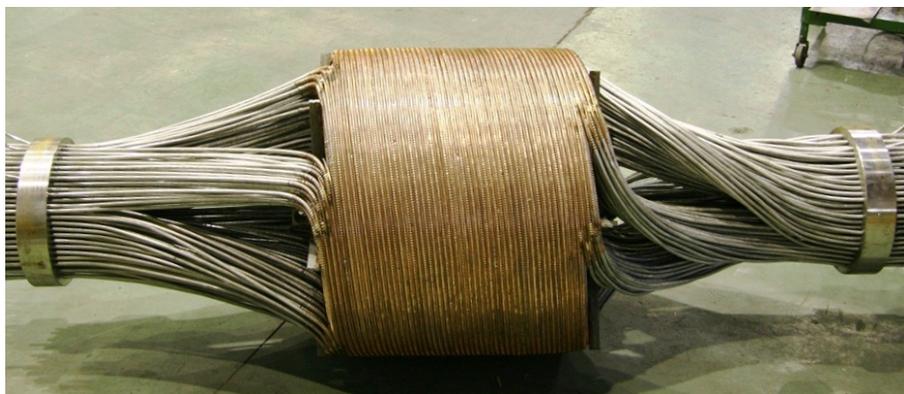


Рис. 1. Общий вид намотки теплообменника

Задача настоящей работы — найти способ интенсификации теплообмена внутри труб в аппаратах, используемых в КГУ, что позволит избежать увеличения габаритов теплообменных аппаратов и установки в целом.

Особенность конструкции витых теплообменных аппаратов заключается в наличии «жесткой» взаимосвязи между выбранным методом интенсификации теплообмена и возможностью его реализации при изготовлении промышленного аппарата. Технология изготовления аппарата при этом является определяющей и может быть подтверждена только при изготовлении теплообменника и последующем проведении экспериментальных исследований. С этой точки зрения не все методы интенсификации теплообмена в трубе могут быть реализованы в применяемой технологии изготовления витых теплообменных аппаратов.

Методам интенсификации теплоотдачи в трубе посвящено большое количество научных работ [5]. Следует отметить, что все исследованные виды интенсификаторов в виде вставок различной конструкции, размещенные внутри трубы, либо образованные изменением ее формы, неприемлемы при изготовлении витого трубчатого теплообменника. Известны работы [6–8], в которых изложены результаты исследований по интенсификации процесса теплообмена за счет создания выступов различной формы внутри труб, которые могут быть использованы при создании витых теплообменных аппаратов.

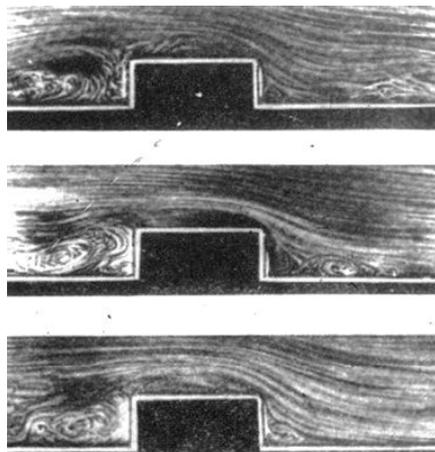


Рис. 2. Обтекание прямоугольных выступов

Так, Р. Кох [8] исходил из известного положения о том, что толщина пограничного слоя тем меньше, тем больше величина касательного напряжения трения на поверхности стенки канала и, следовательно, тем больше коэффициент теплоотдачи. Он считал, что наибольшее касательное напряжение создается в канале, имеющем выступы прямоугольной формы. На рис. 2 представлена картина обтекания таких выступов.

В работе [6] показано, что интенсивность процесса теплообмена можно повышать за счет уменьшения касательного напряжения трения на стенке канала. Для организации такого процесса предлагаются кольцевые выступы — диафрагмы с плавно очерченной формой выступов, образующиеся накаткой на внешней поверхности трубы. На рис. 3 приведена картина обтекания кольцевого выступа.

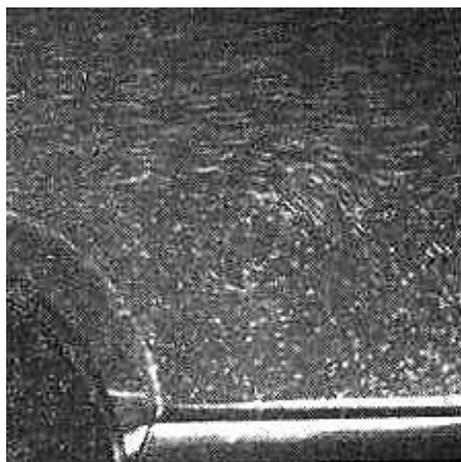


Рис. 3. Обтекание кольцевого выступа

Расчеты показали, что в области работы теплообменников КГУ-5000/4,5 ( $Re = 3000 \dots 8000$ ) наиболее благоприятные соотношения между интенсивностью теплообмена и гидравлическим сопротивлением получены в случае применения интенсификаторов в виде кольцевых выступов (рис. 4). Следует отметить, что выступы на трубе интенсифицируют теплоотдачу не только внутри нее, но и частично снаружи. В работах [5, 6, 9, 10] показано, что при использовании интенсификаторов разной формы коэффициент теплоотдачи внутри труб можно повысить не более чем в 2,5 раза по сравнению с гладкой трубой при сопоставимых условиях.



Рис. 4. Оребренная труба с кольцевыми выступами

В теплообменниках из оребренных проволокой труб с интенсификаторами внутри не представляется возможным теоретически оценить влияние геометрии каналов на процесс теплообмена, поэтому информация может быть получена только опытным путем. Для проведения исследований были изготовлены четыре экспериментальных теплообменника из 14 труб, оребренных проволокой (табл. 1).

Таблица 1

**Геометрические характеристики экспериментальных теплообменников**

Характеристика	Обозначение теплообменника			
	600-100-400	600-100-400и	400-80-250	400-80-250и
Диаметр трубы, мм	6	6	4	4
Диаметр сердечника, мм	56,6	57,0	50,1	52,2
Наружный диаметр теплообменника, мм	123,5	126,7	99,3	100,4
Высота намотки, мм	151,2	101,3	99,0	97,1
Площадь общей наружной поверхности, м <sup>2</sup>	1,04	0,71	0,63	0,62

Два теплообменника из трубки диаметром  $6 \times 0,5$  мм и два теплообменника из трубы диаметром  $4 \times 0,4$  мм с интенсификаторами (обозначено буквой «и») и без них. Опыт создания экспериментальных теплообменников (400-80-250и, 600-100-400и) показал, что интенсификаторы теплообмена в виде диафрагм с плавно очерченной формой выступов, сформированные на медных трубках диаметром 4 и 6 мм, позволяют осуществлять их оребрение проволокой и навивать на сердечники различного диаметра. По результатам измерений деформаций, возникающих в процессе намотки оребренных труб на сердечник, установлено, что это не приводит к заметным изменениям формы единичной диафрагмы. Следовательно, для расчета коэффициентов теплоотдачи в криволинейных каналах можно использовать критериальные зависимости, полученные авторами работы [6] для прямых каналов.

Испытания теплообменников были проведены в теплых условиях на стенде, в качестве рабочего газа был использован воздух. Коэффициент теплоотдачи в гладких трубах вычислялся по уравнениям Краус-сольда [1], а в трубах с интенсификаторами — по зависимостям, учитывающим влияние выступов [6]. Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве определялся косвенным методом. Полученные экспериментальные данные позволили рассчитать характеристики первого по ходу газа теплообменника установки КГУ-5000/4,5, являющегося самым крупным аппаратом в этой установке. Тепловая нагрузка в нем составляет 50 % от нагрузки всех теплообменных аппаратов.

Конструктивные характеристики теплообменников криогенно-гелиевой установки КГУ-5000/4,5, рассчитанные на основе полученных экспериментальных данных, дают представление о размерах блока теплообмена в целом. Результаты расчета этих теплообменников со статистически однородной структурой с интенсификаторами внутри труб и без них приведены в табл. 2. Следует отметить некоторое повышение коэффициента теплоотдачи в межтрубном пространстве.

Таблица 2

**Характеристики теплообменника КГУ- 5000/4,5**

Характеристика	Обозначение теплообменника			
	600-100-400	600-100-400и	400-80-250	400-80-250и
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> · К):				
в трубах	565	1220	567	1160
в межтрубном пространстве	344	380	293	395
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> · К)	129	208	121	204

Характеристика	Обозначение теплообменника			
	600-100-400	600-100-400и	400-80-250	400-80-250и
Площадь поверхности теплообмена, м <sup>2</sup>	1790	1110	1910	1120
Число труб	2083	2653	5772	7962
Число слоев	85	78	140	116
Наружный диаметр, мм	1500	1400	1600	1400
Высота намотки, мм	1650	1140	1000	800
Масса, кг	7150	4500	5500	3350

Результаты экспериментальных исследований показали, что технологически возможно изготовить трубчатый витой теплообменник из труб, оребренных проволокой со статистически однородной структурой теплообменной поверхности с интенсификаторами внутри труб в виде плавно очерченных кольцевых выступов. Было также установлено, что экспериментально полученная величина коэффициента теплоотдачи внутри труб с интенсификаторами примерно в 2 раза выше, чем в гладкой трубе в сопоставимых условиях. Удалось уменьшить до 30 % массу и габариты теплообменников, предназначенных для размещения в крупной гелиевой установке КГУ-5000/4,5.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Красникова О.К. *Витые теплообменные аппараты криогенных и теплоэнергетических установок*. Москва, КолосС, 2008, 176 с.
- [2] Красникова О.К., Попов О.М., Удут В.Н. Компактные теплообменные аппараты энергетических установок с природным газом. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 1999, № 9, с. 15.
- [3] Красникова О.К., Мищенко Т.С., Комарова Л.Р., Попов О.М., Удут В.Н. Витые трубчатые теплообменники. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2002, № 3, с. 32–33.
- [4] Беляков В.П., Пронько В.Г., Епифанова В.И., Красникова О.К., Никиткин В.Д., Мищенко Т.С. *Трубчатый спиральный теплообменник*. АС 542902 СССР, МКИ F28D7/02. №1871186/06, СССР, бюл. № 2, 1973, 4 с.
- [5] Красникова О.К. *Способы интенсификации теплообмена при вынужденной конвекции в аппаратах криогенных систем*. Москва, ЦИНТИхимнефтемаш, 1990, 36 с.
- [6] Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. *Интенсификация теплообмена в каналах*. Москва, Машиностроение, 1990, 208 с.
- [7] Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. *Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 592 с.
- [8] Koch R. Druckverlust und wärmeübergang bei ver wibelter strömung. *VDI-Forschungsheft*, 1958, no. 469, s. 144.

- [9] Мигай В.К. *Повышение эффективности современных теплообменников*. Москва, Энергия, 1980, 144 с.
- [10] Жукаускас А.А. *Интенсификация конвективного теплообмена шероховатостью*. Теплоэнергетика, 1984, № 3, с. 10–13.

Статья поступила в редакцию 20.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сморodin А.И., Фролов И.А. Интенсификация теплообмена в аппаратах гелиевых установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1658>

*Статья подготовлена по материалам доклада,  
представленного на 13-й Международной научно-практической  
конференции «Криогенные технологии и оборудование.  
Перспективы развития», состоявшейся 1–2 ноября 2016 г., Москва*

**Сморodin Анатолий Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ, результаты одного из последних исследований изложены в книге «Безфлюсовая пайка алюминия в криогенной технике». Область научных интересов: процессы и аппараты холодильной и криогенной техники. e-mail: smorodin38@rambler.ru

**Фролов Игорь Анатольевич** — начальник сектора теплообмена ОАО «НПО ГЕЛИЙМАШ». Область научных интересов: разработка теплообменников аппаратуры для криогенных установок и систем. e-mail: igor.a.frolov@mail.ru

## Heat transfer intensification in helium plant assemblies

© A.I. Smorodin<sup>1</sup>, I.A. Frolov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>2</sup> JSC NPO Geliymash, Moscow, 115280, Russia

*Russian cryogenic helium plants feature helical-coil heat exchangers made of copper tubes ribbed with copper wire, so that the heat exchanger surface becomes statistically homogeneous. This structure the right conditions to distribute the flow evenly in the heat exchange annulus. Low parallel flow pressure in KGU-5000/4,5 and a related decrease in heat transfer coefficient in the annulus made us search for possible ways of intensifying heat transfer in the pipe without increasing the size and mass of heat exchangers. We analysed the works of R. Koch and E.K. Kalinin, which lead us to selecting intensifier shape and dimensions so that they look like smoothly outlined ridges. Studies of four test heat exchangers made of wire-ribbed tubes manufactured with and without intensifiers confirmed the technological feasibility of producing a tube-based helical-coil heat exchanger out of tubes ribbed with wire, with internal intensifiers in the shape of smoothly outlined ring-shaped ridges. We determined that the heat transfer coefficient inside tubes with intensifiers is approximately twice as high as that in a smooth tube under comparable conditions. We managed to decrease the size and dimensions of these heat exchangers to install them in a large helium plant.*

**Keywords:** heat exchanger, tube, wire ribbing, heat transfer intensification, heat transfer coefficient, ring-shaped diaphragm ridges, cryogenic helium plant, statistically homogeneous structure

### REFERENCES

- [1] Krasnikova O.K. *Vitye teploobmennye apparaty kriogennykh i teploenergeticheskikh ustanovok* [Helical-coil heat exchangers in cryogenic and thermal engineering plants]. Moscow, KolosS Publ., 2008, 176 p.
- [2] Krasnikova O.K., Popov O.M., Udut V.N. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and Petroleum Engineering*, 1999, no. 9, p. 15.
- [3] Krasnikova O.K., Mischenko T.S., Komarova L.R., Popov O.M., Udut V.N. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and Petroleum Engineering*, 2002, no. 3, pp. 32–33.
- [4] Belyakov V.P., Pronko V.G., Epifanova V.I., Krasnikova O.K., Nikitkin V.D., Mischenko T.S. *Trubchatyy spiralnyy teploobmennik* [Tubular spiral heat exchanger]. Certific. of authorship 542902 SSSR, Intern. class. of invent. F28D7/02. no.1871186/06, USSR, newsletter no. 2, 1973, 4 p.
- [5] Krasnikova O.K. *Sposoby intensifikatsii teploobmena pri vynuzhdennoy konveksii v apparatakh kriogennykh sistem* [Ways of heat transfer intensification for the case of forced convection in cryogenic system assemblies]. Moscow, Central Institute of Scientific and Technical Information on Chemical and Petroleum Machinery Publ., 1990, 36 p.
- [6] Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Heat transfer intensification in pipes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 208 p.
- [7] Ivanov V.L., Leontev A.I., Manushin E.A., Osipov M.I. *Teploobmennye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok*

- [Heat exchanger and cooling systems in gas turbine and combined cycle plants]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2004, 592 p.
- [8] Koch R. *Druckverlust und wärmeübergang bei verwirbelter strömung* [Pressure loss and heat transfer for turbulent flow]. VDI-Forschungsheft, 1958, no. 469, s. 144.
- [9] Migay V.K. *Povyshenie effektivnosti sovremennykh teploobmennikov* [Increasing the efficiency of modern heat exchangers]. Moscow, Energia Publ., 1980, 144 p.
- [10] Zhukauskas A.A. *Teploenergetika — Thermal Engineering*, 1984, no. 3, pp. 10–13.

**Smorodin A.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 250 scientific publications. Results of one of the latest studies can be found in the book titled “*Besflyusovaya payka alyuminiya v kriogennoy tekhnike*” [Flux-free soldering of aluminium]. Specialises in processes and assemblies of refrigeration and cryogenic equipment. e-mail: smorodin38@rambler.ru

**Frolov I.A.**, Head of Heat Transfer Sector, JSC NPO Geliymash. Specialises in developing heat and mass transfer equipment for cryogenic plants and systems. e-mail: igor.a.frolov@mail.ru