

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.165-536.24+532.5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ВИТЫХ ТРУБОК

Ю.М. БРОДОВ, К.Э. АРОНСОН, А.Ю. РЯБЧИКОВ, С.Н. БЛИНКОВ,
В.К. КУПЦОВ, И.Б. МУРМАНСКИЙ

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

Представлены обобщенные данные по эффективности применения профильных витых трубок (ПВТ) в теплообменных аппаратах паротурбинных установок (ПТУ): конденсаторах, аппаратах системы регенеративного подогрева питательной воды, сетевых подогревателях, маслоохладителях, а также в ряде общестанционных и вспомогательных теплообменников ТЭС. Сформулирована величина гарантированного эффекта от применения ПВТ в конкретных аппаратах ПТУ.

Ключевые слова: кожухотрубный теплообменный аппарат, паротурбинная установка, профильная витая трубка, тепловая эффективность, гидродинамическое сопротивление, массогабаритные характеристики аппаратов, удельный расход топлива (теплоты), технико-экономический анализ.

Повышение тепловой эффективности энергетических теплообменных аппаратов в течение многих лет было и остается актуальной задачей как для энергомашиностроения, так и для энергетики [1–7]. Востребованность этих разработок для энергомашиностроения определяется тем, что повышение тепловой эффективности аппаратов позволяет уменьшить их массогабаритные характеристики и облегчить (упростить) компоновку энергоустановок (особенно для транспортных установок). Применительно к условиям эксплуатации повышение тепловой эффективности аппаратов позволяет снизить удельные расходы топлива (теплоты) на энергоустановку в целом. При этом естественно, что одним из основных направлений повышения тепловой эффективности аппаратов рассматривается интенсификация в них процессов теплообмена [1–8].

Применение различно профилированных трубок рассматривается как один из наиболее перспективных путей (методов) повышения эффективности теплообменных аппаратов в промышленности. В ряду различно профилированных трубок, уже применяемых в теплообменных аппаратах различного назначения, широко используются профильные витые трубки (ПВТ) (рис. 1), которые имеют ряд преимуществ перед другими профилированными поверхностями теплообмена: хорошая

изученность; отлаженная, достаточно простая и недорогая технология изготовления; допустимое в большинстве аппаратов увеличение гидродинамического сопротивления и др. [4–7, 9–11]. Весьма существенным является также возможность не изменять существующие (отработанные) технологии сборки кожухотрубных теплообменников при использовании ПВТ вместо гладких трубок.

ПВТ изготавливаются из обычных гладких трубок на специальных приспособлениях методом планетарной обкатки. Поверхность ПВТ представляет собой (рис. 1) дискретное чередование выступов и впадин, выполненных по винтовой линии. При толщине стенки трубки до 1,5 мм внутренняя поверхность трубки эквидистантна наружной [4–7].

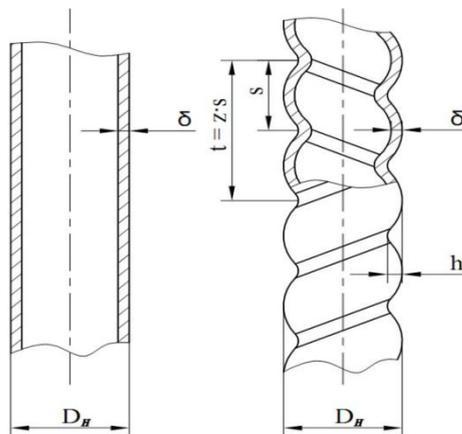


Рис. 1. Трубки теплообменные: *a* — гладкая трубка, *б* — профильная витая трубка (ПВТ): *h* — глубина канавки, мм; *s* — шаг между соседними канавками, мм; *z* — число заходов профилирования; δ — толщина стенки трубки; $D_{\text{н}}$ — наружный диаметр трубки

В настоящей статье, посвященной памяти чл.-корр. РАН Ю.Г. Назмеева и его школы, представлены обобщенные данные по эффективности применения ПВТ в теплообменных аппаратах паротурбинных установок (ПТУ): конденсаторах, аппаратах системы регенеративного подогрева питательной воды, сетевых подогревателей, маслоохладителях, а также в ряде общестанционных и вспомогательных теплообменников ТЭС.

Эффективность применения ПВТ определяется возможностью интенсификации теплообмена со стороны обоих (первичного и вторичного) теплоносителей [4–8]. Интенсификация теплообмена со стороны конденсирующегося пара обусловлена действием сил поверхностного натяжения, изменяющих распределение толщины пленки на поверхности трубки, изменением траектории движения пленки конденсата и ее турбулизацией при высоких паровых нагрузках. Интенсификация со стороны однофазного теплоносителя (вода, масло) вызвана нарушением упорядоченности течения жидкости в вязком подслое за счет его турбулизации и закруткой потока. Гидравлическое сопротивление ПВТ выше, чем у гладких трубок, что требует соответствующего увеличения мощности на прокачку теплоносителя через них. Существенны также стоимость, обоснованный выбор материала, эксплуатационные характеристики трубок (загрязняемость, возможность очистки известными способами), а также показатели надежности (коррозионная стойкость, прочностные и вибрационные характеристики и др.) [5–7, 11].

На основе обобщения всего комплекса теоретических, стендовых и натуральных исследований ПВТ и аппаратов с такими трубками разработана методика расчетов теплообменных аппаратов ПТУ с поверхностью теплообмена из ПВТ [4–6, 10].

Разработаны технические условия на изготовление ПВТ [11], которые утверждены Ростехнадзором.

Очевидно, что наиболее достоверным свидетельством, подтверждающим целесообразность применения ПВТ, является опыт длительной эксплуатации промышленных аппаратов с такими трубками в различных условиях эксплуатации. К настоящему времени на 52-х ТЭС РФ функционирует более 700 теплообменных аппаратов с ПВТ, в том числе:

- конденсаторов — 11;
- подогревателей в системе регенеративного подогрева питательной воды (ПНД, сальниковых подогревателей) — 52;
- сетевых подогревателей (горизонтальных и вертикальных) — 39;
- маслоохладителей — 451;
- эжекторов — 75;
- различных вспомогательных теплообменных аппаратов ТЭС — 73.

Выбор оптимальных параметров профилирования ПВТ для каждого теплообменного аппарата осуществлялся по разработанной в УрФУ комплексной методике технико-экономического анализа [5, 10, 12–14], учитывающей большой ряд параметров и характеристик теплоносителей и самих аппаратов (рис. 2). Кроме того, существенное влияние оказывали: место аппарата в схеме турбоустановки (технологической подсистеме ПТУ), нормативная характеристика конкретной турбины, стоимость топлива на конкретной ТЭС и другие факторы.

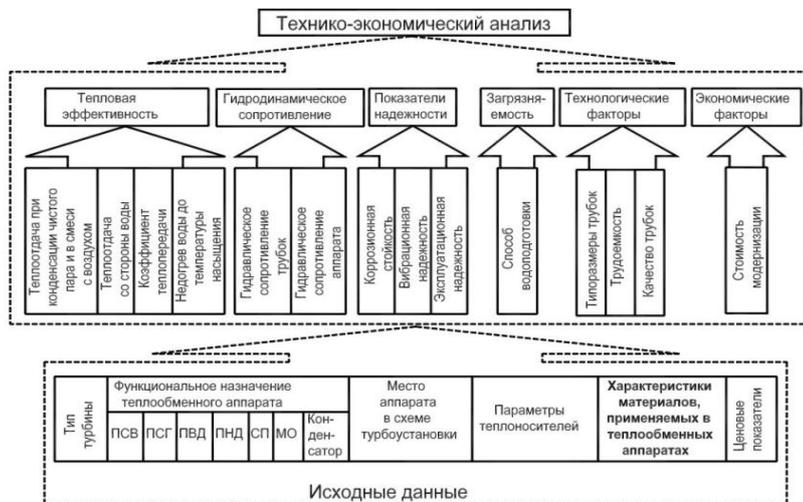


Рис. 2. Блок-схема комплексного обоснования выбора оптимальных параметров профилирования ПВТ для теплообменных аппаратов ПТУ

При разработке и модернизации теплообменных аппаратов за счет применения в них ПВТ авторами предложен, апробирован и реализован ряд новых технических решений, позволивший успешно решить возникающие в процессе эксплуатации аппаратов проблемы [1–5, 13]. К таким относятся:

- сохранение неизменных внешних присоединительных размеров серийных аппаратов (по трубопроводам и корпусам);
- обоснование выбора материалов трубных систем и элементов корпусов (в т.ч. водяных камер);
- повышение вибрационной надежности трубных систем аппаратов (т.к. изгибная жесткость ПВТ отличается от гладких трубок [13]) за счет установки специальных демпфирующих поясов и скреп;

- применение высокоэффективного способа крепления ПВТ (концы гладкие) в трубных досках за счет кольцевых рельефов, сформированных в отверстиях трубных досок [5];
- эффективное уплотнение зазоров между промежуточными перегородками и корпусом (для маслоохладителей);
- применение специальных защитных (антикоррозионных) покрытий для трубных досок аппаратов.

На рис. 3 — 7 в качестве примера представлены результаты сравнительных (в сопоставимых условиях) испытаний ряда теплообменных аппаратов ПТУ с ПВТ и гладкими трубками.

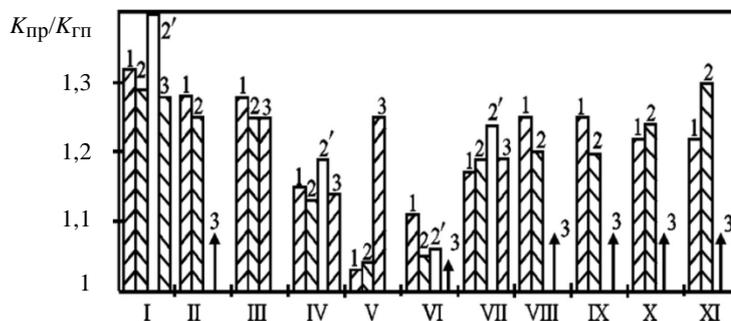


Рис. 3. Сопоставление расчетных, опытных и эксплуатационных данных по эффективности применения ПВТ в горизонтальных аппаратах паровых турбин на номинальном режиме работы.

Конденсаторы: I — турбина ПТ-25-90/10, ТЭЦ-7 Ленэнерго, $t_{1в} = 6—20^{\circ}\text{C}$; II — турбина Т-100/110-130, ТЭЦ-20 Мосэнерго, $t_{1в} = 12—20^{\circ}\text{C}$; III — турбина ПТ-12-35/10, Камышинская ТЭЦ, $t_{1в} = 6—20^{\circ}\text{C}$; IV — турбина К-200-130, Кураховская ГРЭС, $t_{1в} = 6—12^{\circ}\text{C}$; V — турбина К-200-130, Смоленская ГРЭС, $t_{1в} = 6^{\circ}\text{C}$; VI — турбина К-200-130, Шатурская ГРЭС, $t_{1в} = 6—12^{\circ}\text{C}$; VII — турбина К-2,5-1,2, Свердловская ТЭЦ-1, $t_{1в} = 6—20^{\circ}\text{C}$; VIII — турбина ПТ-60/70-130/13, Пермская ТЭЦ-14, $t_{1в} = 17—21^{\circ}\text{C}$; IX — турбина ПТ-135/165-130/15, Пермская ТЭЦ-14, $t_{1в} = 17—21^{\circ}\text{C}$; сетевые подогреватели: X — турбина Т-50-130, ПСГ-1300-3-8-I, Пермская ТЭЦ-14, $t_{1в} = 56—74^{\circ}\text{C}$; XI — турбина Т-50-130, ПСГ-1300-3-8-II, Пермская ТЭЦ-14, $t_{1в} = 17—21^{\circ}\text{C}$; 1 — расчетные данные; 2, 2' — результаты испытаний; 3 — данные эксплуатации (стрелка — зафиксировано качественное увеличение)

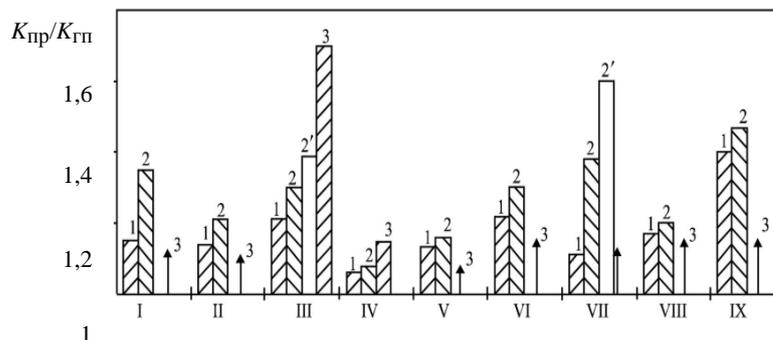


Рис. 4. Сопоставление расчетных, опытных и эксплуатационных данных по эффективности применения ПВТ в вертикальных аппаратах паровых турбин на номинальном режиме работы: I — ПНД-3 турбины К-100-90-5, ВТГРЭС; II — БВ-1350x2 турбины Т-100/110-130, СУГРЭС; III — БП-500 ст. №6, СУГРЭС; IV — БП №5, СУГРЭС; V — БП №7, СУГРЭС; VI — БП-500, Красногорская ТЭЦ; VII — БО-350 ст. №2, Свердловская ТЭЦ-1; VIII — БП-200 ст. №1, ВТГРЭС; IX — БО-350 ст. №4, Первоуральская ТЭЦ-1; 1 — расчетные данные; 2, 2' — результаты испытаний; 3 — данные эксплуатации (стрелка — зафиксировано качественное увеличение)

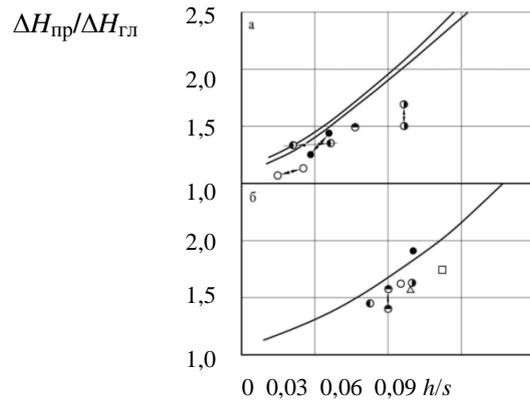


Рис. 5. Сопоставление расчетных и опытных данных по гидродинамическому сопротивлению аппаратов с ПВТ на номинальном режиме работы: *a* — конденсаторы турбин: ● — ПТ-25-90/10, ТЭЦ-7 Ленэнерго; ● — К-200-130, Кураховская ГРЭС; ○ — К-200-130, Смоленская ГРЭС; ● — К-200-130, Шатурская ГРЭС; ● — К-50-29, СУГРЭС; *б* — сетевые подогреватели: ○ — БП №6, СУГРЭС; ● — БО №2, Свердловская ТЭЦ-1; △ — БВ-1350х2 турбины Т-100/110-130 (ТГ № 6) СУГРЭС; ▲ — БП №7, СУГРЭС; ● — БП №5, СУГРЭС; ● — БП №4, Красногорская ТЭЦ; □ — БО-550, ТЭЦ-7, Ленэнерго; ● — БП №1, ВТГРЭС

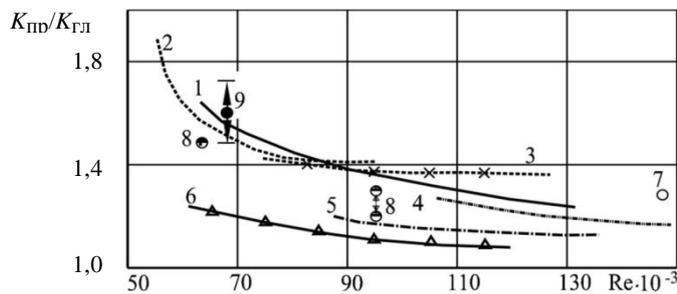


Рис. 6. Увеличение коэффициента теплопередачи в вертикальных теплообменных аппаратах с ПВТ по сравнению с гладкотрубными аппаратами: 1— БП № 6, СУГРЭС; 2— БО № 2, Свердловская ТЭЦ-1; 3— ПНД-3 турбины К-100-90 (ТГ № 6), ВТГРЭС; 4— БВ-1350х2 турбины Т-100/110-130 (ТГ № 6), СУГРЭС; 5— БП № 7, СУГРЭС; 6— БП № 5, СУГРЭС; 7— БП № 4, Красногорская ТЭЦ; 8— БП № 1, ВТГРЭС; 9— БО № 5, ТЭЦ-7, Ленэнерго

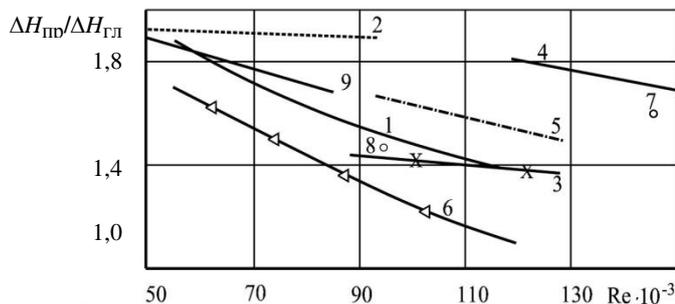


Рис. 7. Увеличение гидродинамического сопротивления вертикальных теплообменных аппаратов с ПВТ по сравнению с гладкотрубными аппаратами: 1— БП № 6, СУГРЭС; 2— БО № 2, Свердловская ТЭЦ-1; 3— ПНД-3 турбины К-100-90 (ТГ № 6), ВТГРЭС; 4— БВ-1350х2 турбины Т-100/110-130 (ТГ № 6), СУГРЭС; 5— БП № 7, СУГРЭС; 6— БП № 5, СУГРЭС; 7— БП № 4, Красногорская ТЭЦ; 8— БП № 1, ВТГРЭС; 9— БО № 5, ТЭЦ-7 Ленэнерго

Обобщение всего комплекса исследований по эффективности применения ПВТ в теплообменных аппаратах ПТУ [4–14] позволило определить величину гарантированного эффекта увеличения коэффициента теплопередачи в аппаратах с ПВТ по сравнению с гладкотрубными аппаратами: в конденсаторах – 15 %, в ПНД — от 35 до 40 %, в сетевых подогревателях – от 20 до 40 %. Гидравлическое сопротивление аппаратов при этом увеличивается на 40–70 %.

Считаем, что вышеуказанный гарантированный эффект увеличения коэффициента теплопередачи в теплообменных аппаратах ПТУ с ПВТ, а также длительный (более 30 лет) опыт эксплуатации различных аппаратов с ПВТ показывают целесообразность применения ПВТ как в теплообменных аппаратах ПТУ, так и в энергетических аппаратах другого назначения. При этом соответствующие эффекты будут достигнуты (обеспечены) как у заводов-изготовителей энергетических установок, так и на ТЭС, что по-прежнему остается актуальной задачей для энергетики и энергомашиностроения [1–7].

Выводы

Применение профильных витых трубок рассматривается в настоящее время как один из перспективных и наиболее апробированных методов повышения эффективности теплообменных аппаратов паротурбинных установок ТЭС. Длительный (более 30 лет) опыт эксплуатации теплообменных аппаратов с ПВТ в технологических подсистемах ряда ПТУ, в различных условиях эксплуатации, подтвердил высокую эффективность и целесообразность применения ПВТ (при оптимально выбранных параметрах профилирования) вместо гладких трубок.

Для определения целесообразности применения ПВТ в конкретных теплообменных аппаратах и обоснования оптимальных параметров профилирования трубок необходимо проведение технико-экономического анализа, учитывающего ряд факторов, определяющих эффективность и надежность аппарата, его место в технологической подсистеме турбоустановки, стоимостные показатели и др.

Summary

The generalized data are presented on the effectiveness of twisted profile tubes (TPT) in steam turbine heat exchangers: condensers, feed water heaters, hot water heaters, oil coolers, general and auxiliary power station heat exchangers. The guaranteed value is specified of the effect of TPT application in specific steam turbine heat exchangers.

Key words: Shell-and-tube heat exchanger, steam turbine unit, thermal efficiency, twisted profile tubes, hydrodynamic resistance, weight and size characteristics, specific fuel (heat) consumption, feasibility study.

Литература

1. Назмеев Ю.Г. Теплообменные аппараты ТЭС. 2-е изд. / Ю.Г. Назмеев, В.М. Лавыгин. М.: Издательство МЭИ, 2002. 260 с.
2. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС. М.: Издательство МЭИ, 2002. 612 с.
3. Теплообменные аппараты ТЭС: справочник в 2-х кн. Кн. 1/под общей ред. чл.-корр. РАН Ю.Г. Назмеева и проф. В.Н. Шлянникова. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 491 с.
4. Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок/Ю.М.Бродов, К.Э.Аронсон, А.Ю.Рябчиков, М.А. Ниренштейн / под общ. ред. Ю.М. Бродова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 480 с.
5. Повышение эффективности и надежности теплообменных аппаратов паротурбинных установок: 4-е изд., перераб. и доп. / Ю.М.Бродов, К.Э.Аронсон, В.И. Брезгин[и др.] / под общ. ред. д.т.н. Ю.М. Бродова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 570 с.

6. Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов / К.Э.Аронсон, С.Н.Блинков, В.И. Брезгин[и др.] / под общ. ред. проф., д-ра техн. наук Ю.М. Бродова. Изд. третье, перераб. и доп. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014.830 с.

7. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В.Фролов (пред.) и др. М.: Инновационное машиностроение. Теплообменные аппараты технологических подсистем турбоустановок. Т. IV-10. / К.Э.Аронсон, В.И. Брезгин, Ю.М.Бродов [и др.] / под общей ред. Ю.М. Бродова и др. 2016.472 с.

8. Леонтьев А.И. Анализ эффективности пристенных закручивателей потока (обзор) / А.И.Леонтьев, В.В. Олимпиев // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 68—78.

9. А.С. 1071068 СССР. Теплообменная труба конденсатора / Р.З.Савельев, Ю.М.Бродов, А.Ю.Рябчиков // Открытия, изобретения, 1984. № 1.

10. Бродов Ю.М. Методика расчетов теплообменных аппаратов с поверхностью теплообмена из профильных витых труб /Ю.М. Бродов, В.А. Пермяков // Труды НПО ЦКТИ, Л.: Изд-во ЦКТИ, 1989. № 252. С. 66 — 69.

11. ТУ 3612-001-97941494-2009. Трубы профильные витые теплотехнического назначения. Введение в действие 25.12.2009. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.30 с.

12. Бродов Ю.М. О необходимости комплексного обоснования разработок по совершенствованию энергетических теплообменных аппаратов / Ю.М. Бродов /// Изв. Литовской Академии наук: серия Энергетика. 1991. № 2. С. 5–14.

13. Прочностные и вибрационные характеристики профильных витых труб / П.Н.Плотников, В.И.Климанов, Ю.М.Бродов, В.К.Купцов // Теплоэнергетика. 1983. № 6. С. 68—71.

14. Оценка экономической эффективности модернизации энергетического оборудования / З.Ю.Козьмина, Ю.М.Бродов, А.Ю. Домников[и др.] // Электрические станции. 2003. № 12.С. 22—26.

Поступила в редакцию

11 мая 2016 г.

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук., профессор, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). Тел.: 8(343)375-48-51.

Аронсон Константин Эрленович – д-р техн. наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). Тел.: 8(922)205-41-24. E-mail: lta_ugtu@mail.ru, k.e.aronson@urfu.ru.

Рябчиков Александр Юрьевич – д-р техн. наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

Блинков Станислав Николаевич – старший научный сотрудник кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

Купцов Валерий Константинович – старший научный сотрудник кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

Мурманский Илья Борисович – младший научный сотрудник кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).