

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА ANSYS ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОРЕБРЕННОГО РЕКУПЕРАТОРА

Е. В. Романова<sup>1</sup>, А. Н. Колиух<sup>1</sup>, Е. А. Лебедев<sup>2</sup>

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия; kvider@cen.tstu.ru;*

*Международный учебно-научный центр трансфера фармацевтических  
и биотехнологий, ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева» (2), г. Москва, Россия*

**Ключевые слова:** газодинамическое моделирование; гидравлическое сопротивление; оребренный рекуператор; ANSYS.

**Аннотация:** Рассмотрены методы интенсификации тепловых процессов в простейших теплообменных аппаратах. Предложено конструктивное решение теплообменного аппарата для рекуперации тепла, представляющего собой теплообменник типа «труба в трубе» со штыревым оребрением и установленным турбулизатором в межтрубном пространстве. Показана тепловая эффективность оребренного теплообменника в сравнении с теплообменником с гладкими трубами такого же размера. Построена полномерная 3D-модель оребренного теплообменника в программном комплексе ANSYS. Даны рекомендации по подбору сетки для моделирования. Проведено исследование адекватности расчета гидравлического сопротивления оребренного рекуператора с использованием программного комплекса ANSYS (модуль FLUENT) в сравнении с экспериментальными данными; сделан вывод о возможности применения программного данного комплекса для моделирования.

Рациональное и эффективное использование топливно-энергетических ресурсов – одна из важнейших проблем данной отрасли. С ростом энергетических мощностей и объемов производства происходит увеличение габаритов применяемых теплообменных аппаратов. Создание более эффективных и компактных теплообменников позволяет значительно экономить топливо, металлы и снизить затраты труда.

Методы интенсификации можно разделить на пассивные (не требующие прямых затрат энергии), активные (требующие подвода энергии извне) и комбинированные [1 – 3]. В современных теплообмен-

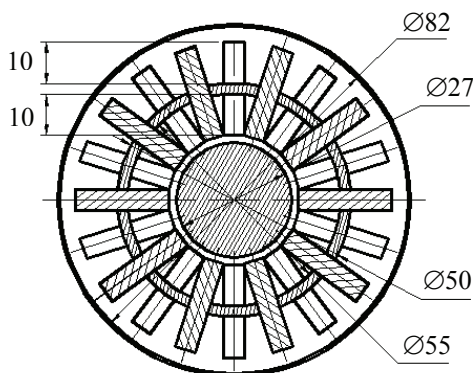


Рис. 1. Теплообменник в разрезе

ных аппаратах чаще всего используют пассивные методы интенсификации теплоотдачи. Высокоэффективным часто оказывается применение комбинированных методов интенсификации: сочетание турбулизаторов с оребрением поверхностей. Применение оребрения каналов и труб снаружи и внутри целесообразно при небольших тепловых потоках, что характерно для теплообменных аппаратов систем охлаждения, кондиционирования воздуха и позволяет интенсифицировать теплоотдачу, уменьшить габаритные размеры.

Предложено конструктивное решение теплообменного аппарата для рекуперации тепла, представляющего собой теплообменник типа «труба в трубе» [4]. В целях повышения интенсивности теплопередачи между холодным воздухом, поступающим в межтрубное пространство, и горячим воздухом, проходящим по внутренней трубе, внутренняя труба выполнена из меди с ребрами и оребрена штырями, расположенными в шахматном порядке. Также в трубном пространстве был установлен «турбулизатор-заглушка» для уменьшения сечения трубного пространства и увеличения скорости потока в нем. Геометрические размеры теплообменника, мм, показаны на рис. 1, общее число штырей 320 шт., диаметром 6 мм, 32 ряда по 10 штырей, штыри расположены в шахматном порядке с шагом 17 мм, длина оребренной части трубы 500 мм. Внутренние диаметры входных – выходных патрубков для трубного пространства 61 мм, для межтрубного 51 мм.

На рисунке 2 показана фотография внутренней трубы с оребрением, используемая для проведения натуральных экспериментов. Тепловая эффективность данного теплообменника кратко рассмотрена в [5]. Результаты экспериментов на установке с рекуперацией тепла в сравнении с теплообменником с гладкими трубами такого же размера показаны в табл. 1, где также представлены данные по количеству передаваемой теплоты в зависимости от расхода подаваемого воздуха такого же теплообменника, полученные по результатам расчета [6]. Очевидно, что оребренный теплообменник при тех же габаритных размерах в 5 – 10 раз передает больше тепла, чем теплообменник с гладкими трубами.

Одна из важнейших характеристик теплообменника – его гидравлическое сопротивление. Для сравнения и анализа гидравлического сопротивления оребренного теплообменника с обычным теплообменником «труба в трубе» создана экспериментальная установка, позволяющая получать гидравлические сопротивления трубного и межтрубного пространств при различных расходах воздуха. Экспериментальная установка показана на рис. 3.

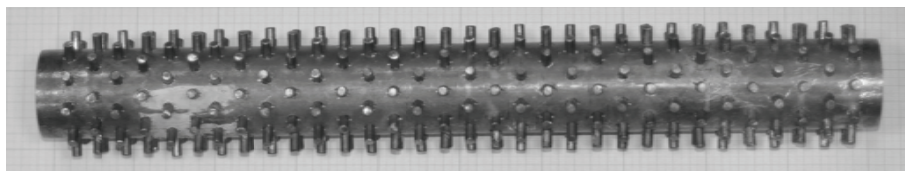
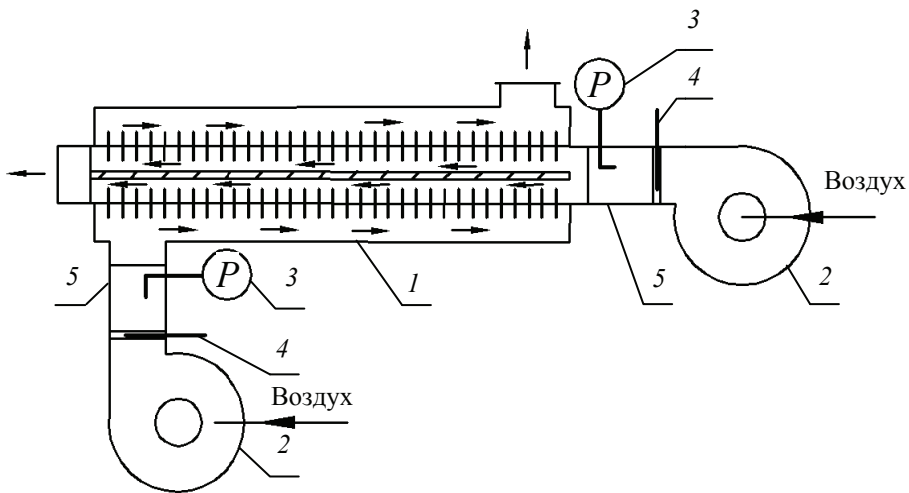


Рис. 2. Внутренняя оребренная труба теплообменника

Таблица 1

Результаты экспериментов на установке с рекуперацией тепла, Вт, в сравнении с теплообменником с гладкими трубами

Трубы	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч						
	4,3	5,7	7	10,6	14,1	35	70
Оребренные	62	83	102	133	151	223	246
Гладкие	6,3	6,6	7	7,9	9,3	22,3	55

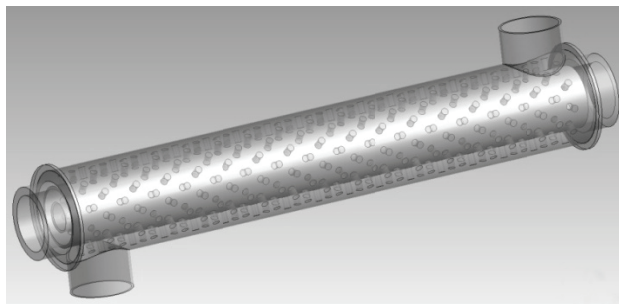


**Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования гидравлического сопротивления оребренного теплообменника:**  
 1 – оребренный теплообменник; 2 – воздуходувка; 3 – микроманометр; 4 – заслонка;  
 5 – участок стабилизации потока

Воздуходувкой 2 воздух при комнатной температуре 21...23 °С подается в оребренный теплообменник 1, в котором для стабилизации возможных пульсаций давления предусматривается участок стабилизации потока 5. На входе в трубное и межтрубное пространства теплообменника измеряют статическое давление с помощью микроманометра 3. Регулирование расхода подаваемого в теплообменник воздуха производится с помощью заслонки 4.

Для моделирования процесса течения в теплообменнике, проходящего в модуле FLUENT пакета ANSYS v17.0, хорошо зарекомендовавшего себя [7 – 14], построена полномерная 3D-модель теплообменника, показанная на рис. 4.

Расчет проводят на компьютере с процессором Intel Core i5-6600K и оперативной памятью 64 ГБ; построение модели – в DesignModeler; наложение сетки со сгущением в пристенной области в ANSYS ICEM CFD. Важно, что размер ячеек сетки значительно влияет на получаемые результаты. Причем отмечено, что «грубая» сетка сильно завышает гидравлическое сопротивление. Подбор параметров сетки выполнен следующим образом: сначала проводился расчет с «авто»-сеткой, затем сетка вдвое измельчалась и т.д. до получения результатов, не отличающихся друг от друга с точностью до 10 %.



**Рис. 4. 3D-модель теплообменника**

В качестве модели течения использовалась SST-модель, хорошо показавшая себя в широком диапазоне изменения критерия Re [15, 16]. Для уменьшения объема вычислений расчет трубного и межтрубного пространств проводился отдельно друг от друга. На рисунке 5 показано изменение давления воздуха при его прохождении по трубному пространству теплообменника при скорости потока в входном штуцере равной 5 м/с.

В результате расчета в пакете ANSYS получены данные по гидравлическому сопротивлению трубного и межтрубного пространств. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных приведены в табл. 2.

Для сравнения сопротивлений выполнен расчет в ANSYS гидравлических сопротивлений теплообменника при тех же скоростях такого же размера, но без оребрения (см. табл. 3).

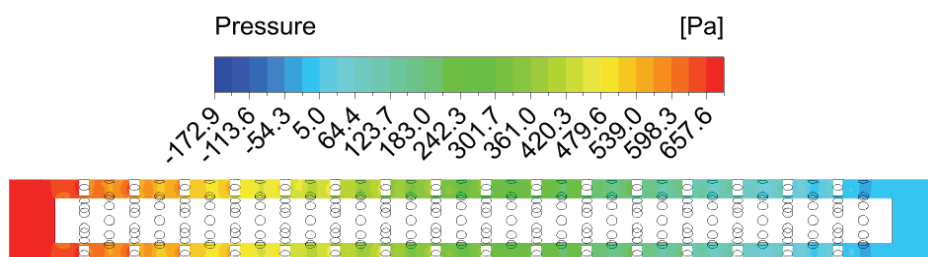


Рис. 5. Изменение давления в трубном пространстве

Таблица 2

**Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , Па**

Расчетные характеристики	Средняя скорость воздуха во входных сечениях, м/с								
	0,05	0,5	1	1,5	2	5	10	15	20
<i>Оребренный теплообменник</i>									
Трубное пространство:									
	экспериментальное	0,5	16	40,5	98,5	163,7	753,3	1872,1	3450
расчетное	0,5	18,2	42	102,7	148,7	671	2120	3730	5920
Отклонение, %	0	13,8	3,7	4,3	9,1	10,9	13,2	8,1	5,7
Межтрубное пространство:									
	экспериментальное	0,2	1	2,1	3,4	5,1	42,1	148,6	393,3
расчетное	0,18	0,86	1,8	2,9	4,5	40,2	158	370,1	725,5
Отклонение, %	10	14	14,3	14,7	11,7	4,5	6,3	5,9	4,2
<i>Теплообменник без оребрения</i>									
Трубное пространство	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0,33	0,43	0,52	0,7	3,5	11,7	25	39
Межтрубное пространство	$3 \cdot 10^{-2}$	0,3	0,33	0,35	0,44	2,2	7,37	16	25

Проведенное исследование позволило подтвердить адекватность полученных данных при моделировании в процессе течения воздуха в оребренном теплообменнике в пакете ANSYS. Очевидно, что в результате моделирования максимальное отклонение от экспериментальных данных составляет не более 15 %. Таким образом можно сделать вывод, что пакет ANSYS позволяет получать надежные данные о распределении скоростей и давлений воздуха в рекуператоре.

#### *Список литературы*

1. Справочник по теплообменникам: в 2 х т. / пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 352 с.
2. Попов, И. А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / И. А. Попов, Ю. Ф. Гортышов, В. В. Олимпиев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 1. – С. 3 – 14.
3. Bejan, A. Heat Transfer Handbook / A. Bejan, A. D. Kraus. – Hoboken ; N. J. : Jonh Wiley & Sons, Inc., 2003. – 1427 p.
4. Романова, Е. В. Новое конструктивное решение теплообменного аппарата для рекуперации тепла / Е. В. Романова, А. Н. Колиух // Актуальные вопросы науки : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 25 октября 2012. – М., 2013 – С. 6 – 9.
5. Коновалов, В. И. Исследование процесса теплообмена в оребренном трубчатом рекуператоре / В. И. Коновалов, Е. В. Романова, А. Н. Колиух // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 876 – 880.
6. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М. : Атомиздат, 1979. – 416 с.
7. Bholia Mayank. Heat Transfer Enhancement in Concentric Tube Heat Exchanger in ANSYS FLUENT 14.5 [Электронный ресурс] / Mayank Bholia, Mr. Vinod Kumar, Dr. Satyendra Singh // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – Vol. 2, Issue 3. – March 2015. – Режим доступа : [http://ijiset.com/vol2/v2s3/IJSET\\_V2\\_I3\\_59.pdf](http://ijiset.com/vol2/v2s3/IJSET_V2_I3_59.pdf) (дата обращения : 05.10.2017).
8. Joshi Kanika. Investigation on Heat Transfer Rate in Concentric Tube Heat Exchanger Using Pentagonal Shape Inserts in ANSYS FLUENT 14.5 with Varying Mass Flow Rate for Parallel Flow [Электронный ресурс] / Kanika Joshi, Shivasheesh Kaushik, Vijay Bisht // International Journal of Scientific & Engineering Research. – Vol. 8, Issue 5. – May-2017. – P. 1092 – 1102. – Режим доступа: <https://www.ijser.org/onlineResearchPaperViewer.aspx?Investigation-on-Heat-Transfer-Rate-in-Concentric-Tube-Heat-Exchanger-Using-Pentagonal-Shape-Inserts-in-ANSYS-FLUENT-14-5.pdf> (дата обращения : 05.10.2017).
9. Ахмедзянов, Д. А. К вопросу об адекватности трехмерного газодинамического моделирования ГТД в современных программных комплексах / Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов // Вест. Уфимского гос. авиац. техн. ун-та. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 11 – 20.
10. Babu C Rajesh. CFD Analysis of Heat Transfer Enhancement by Using Passive Technique in Heat Exchanger [Электронный ресурс] / C Rajesh Babu and Santhosh Kumar Gugulothu // International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH). – Vol. 4, No. 3. – August 2015. – Режим доступа : <http://wireilla.com/engg/ijmech/papers/4315ijmech08.pdf> (дата обращения : 05.10.2017).
11. Расчетно-экспериментальное исследование термопульсаций фрагмента коллекторного узла теплообменника системы очистки и расхолаживания водородных реакторов / С. М. Дмитриев [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 92 – 102.

12. Щербаков, М. А. Определение коэффициентов теплоотдачи при моделировании задач в ANSYS CFX / М. А. Щербаков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7. – С. 165 – 169.

13. Голованчиков, А. Б. Моделирование процесса нагревания воздуха конденсирующимся паром в двухтрубном теплообменнике / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькина // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 255 – 263.

14. Голованчиков, А. Б. Моделирование работы двухтрубного теплообменника при кипении жидкости, нагреваемой дымовыми газами / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькина // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 387 – 396.

15. Ахмедзянов, Д. А. Верификация расчета процесса теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX / Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов // *Вестн. Уфимского гос. авиац. техн. ун-та*. – 2009. – Т. 13, № 2. – С. 226 – 232.

16. Кривошеев, И. А. Выбор модели турбулентности при расчете потерь давления в проточной части ГТД с использованием программного комплекса ANSYS CFX / И. А. Кривошеев, А. Ю. Чечулин, Ю. А. Хохлова // *Вестн. Уфимского гос. авиац. техн. ун-та*. – 2011. – Т. 15, № 2 (42). – С. 68 – 73.

---

## Application of the ANSYS Package in Research of Hydraulic Resistance of Finned Heat Exchanger

E. V. Romanova<sup>1</sup>, A. N. Koliukh<sup>1</sup>, E. A. Lebedev<sup>2</sup>

*Department of Technological Processes, Apparatus and Anthropogenic Safety, TSTU (1), Tambov, Russia; kvidep@cen.tstu.ru;*

*International Educational and Scientific Center for Pharmaceutical Transfer and Biotechnology, "D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology"(2), Moscow, Russia*

**Keywords:** finned heat exchanger; ANSYS, gas-dynamic simulation, hydraulic resistance.

**Abstract:** Methods for the intensification of thermal processes in simple heat exchangers are considered. A structural solution of the heat exchanger for heat recovery, which is a pipe-in-pipe heat exchanger with pin finning and with an installed turbulator in the shell space, is proposed. The thermal efficiency of the finned heat exchanger is shown in comparison with a heat exchanger with smooth tubes of the same size. A full-dimensional 3D model of finned heat exchanger in the ANSYS software package is constructed. Recommendations for the selection of a grid for modeling are given. The adequacy of calculating the hydraulic resistance of a finned heat exchanger using the ANSYS software package (FluentFlow module) in comparison with the experimental data was studied. The comparison with the experimental data enables to conclude that the ANSYS software package is suitable for modeling.

### References

1. Martynenko O.G. *Spravochnik po teploobmennikam* [Handbook of heat exchangers], Moscow: Energoatomizdat, 1987, vol. 1, 352 p. (In Russ.)

2. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V. [Industrial application of heat exchange intensification - the current state of the problem (overview)], *Teploenergetika* [Heat power engineering], 2012, no. 1, pp. 3-14. (In Russ.)

3. Bejan A., Kraus A.D. *Heat Transfer Handbook*, Hoboken; N.J.: John Wiley & Sons, Inc., 2003, 1427 p.
4. Romanova E.V., Koliukh A.N. *Aktual'nye voprosy nauki: materialy VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of science: materials of the VII International Scientific and Practical Conference], Moscow: 2012, pp. 6-9. (In Russ.)
5. Konovalov V.I., Romanova E.V., Koliukh A.N. [Investigation of heat transfer in a finned tube recuperator], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 876-880. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer], Moscow: Atomizdat, 1979, 416 p. (In Russ.)
7. [http://ijiset.com/vol2/v2s3/IJISSET\\_V2\\_I3\\_59.pdf](http://ijiset.com/vol2/v2s3/IJISSET_V2_I3_59.pdf) (accessed 5 October 2017). (In Russ.)
8. <https://www.ijser.org/onlineResearchPaperView-er.aspx?Investigation-on-Heat-Transfer-Rate-in-Concentric-Tube-Heat-Exchanger-Using-Pentagonal-Shape-Inserts-in-ANSYS-FLUENT-14-5.pdf> (accessed 5 October 2017). (In Russ.)
9. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. [To the question of the adequacy of the three-dimensional gas dynamic modeling of GTE in modern software systems], *Transactions of Yfa State Aviation Technical University* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2008, vol. 10, no. 1, pp. 11-20. (In Russ.)
10. <http://wireilla.com/engg/ijmech/papers/4315ijmech08.pdf> (accessed 5 October 2017). (In Russ.)
11. Dmitriev S.M., Ryazov R.R., Soborno A.E., Kotin A.V., Mamaev A.V. [Calculation and experimental investigation of the thermopulsation of a fragment of the collector assembly of a heat exchanger for the purification and cooling of water-cooled reactors], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika* [News of higher educational institutions. Nuclear energy], 2015, no. 1, pp. 92-102. (In Russ.)
12. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit\\_2011\\_7\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2011_7_35) (In Russ.)
13. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Dul'kina N.A. [Modeling the process of heating the air with condensing steam in a two-pipe heat exchanger], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 255-263. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Dul'kina N.A. [Simulation of the operation of a two-pipe heat exchanger in the boiling of a liquid heated by flue gases], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 387-396. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. [Verification of calculation of the heat exchange process in the ANSYS CFX software package], *Transactions of Yfa State Aviation Technical University* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2009, vol. 13, no. 2, pp. 226-232. (In Russ.)
16. Krivosheev I.A., Chechulin A.Yu., Khokhlova Yu.A. [The choice of the model of turbulence in calculating the pressure losses in the flow part of the GTE using the ANSYS CFX software package], *Transactions of Yfa State Aviation Technical University* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2011, vol. 15, no. 2 (42), pp. 68-73. (In Russ.)

---

### **Anwendung des ANSYS-Pakets bei der Forschung des hydraulischen Widerstands des Rippenwärmetauschers**

**Zusammenfassung:** Es sind die Methoden der Intensivierung der thermischen Prozesse in den einfachsten Wärmetauschern untersucht. Eine konstruktive Lösung des Wärmetauschers für die Wärmerückgewinnung ist vorgeschlagen. Der vorgeschlagene

Wärmetauscher stellt einen Wärmetauscher vom Typ "Rohr im Rohr" mit Stifaluminiumlamellen und mit dem installierten Turbulenzverstärker in dem Zwischenrohrraum dar. Es ist der thermische Wirkungsgrad des Rippenwärmetauschers im Vergleich zu einem Wärmetauscher mit glatten Rohren gleicher Größe gezeigt. Das vollmäßige 3D-Modell des Rippenwärmetauschers im Programmkomplex ANSYS ist gebaut. Es sind Empfehlungen für die Auswahl eines Rasters für Modellierung gegeben. Eine Untersuchung der Relevanz der Berechnung der Angemessenheit des hydraulischen Widerstands des Rippenwärmetauschers ist mit der Benutzung des Softwarepakets ANSYS (Modul Fluent Flow) im Vergleich mit experimentellen Daten durchgeführt. Aufgrund des Vergleichs mit experimentellen Daten wurde die Schlussfolgerung über die Möglichkeit der Anwendung des Softwarepakets ANSYS für die Modellierung gezogen.

---

### **Utilisation du paquet ANSYS lors de l'étude de la résistance hydraulique du récupérateur nervuré**

**Résumé:** Sont examinées les méthodes de l'intensification des procédés thermiques dans les appareils simples d'échange thermique. Est proposée une solution constructive de l'appareil d'échange pour la récupération de la chaleur représentant un échangeur thermique de type «pipe-in-pipe» avec un nervurage mâle et avec une installation du turbuliseur dans un espace entre tubes. Est montrée une efficacité thermique de l'échangeur thermique nervuré en comparaison avec un échangeur thermique à tubes lisses de la même taille. Est donstruit un modèle 3D de l'échangeur thermique nervuré dans le complexe informatique ANSYS. Sont données des recommandations pour la sélection de la grille de la simulation. Est effectuée l'étude des calculs de la résistance avec l'emploi du complexe informatique ANSYS. A la base de la comparaison avec les données expérimentales est faite la conclusion sur la possibilité de l'application du complexe informatique ANSYS pour la simulation.

---

**Авторы:** *Романова Елена Васильевна* – ассистент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Колух Александр Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Лебедев Евгений Александрович* – кандидат технических наук, научный сотрудник МУНЦ ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», г. Москва, Россия.

**Рецензент:** *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---