

**ЛЕОНИД АЛЕКСЕЕВИЧ ЧЕРНЯЕВ**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*leo@psu.karelia.ru*

**ТИММО АЛЕКСАНДРОВИЧ ГАВРИЛОВ**

аспирант кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*gavrilov@psu.karelia.ru*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛИЗАЦИИ ЖИДКОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООБМЕННИКА\*

Исследуется влияние турбулизации охлаждающей жидкости внутри алюминиевых теплообменников сельскохозяйственных тракторов на эффективность их теплоотдачи. Для создания турбулизации охлаждающей жидкости внутри трубок алюминиевых теплообменников устанавливают пластиковые винтообразные турбулизаторы, которые образуют завихрения потока охлаждающей жидкости в теплообменнике. Исследование производилось на тепловой аэродинамической трубе в научно-исследовательской лаборатории Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. Сущность исследования заключалась в сравнительных испытаниях алюминиевых теплообменников сельскохозяйственных тракторов без турбулизаторов и с турбулизаторами в виде витых вставок на основе термостойкой пластмассы. По результатам исследования получены функциональные зависимости гидравлического сопротивления, теплоотдачи и коэффициента теплопередачи алюминиевых теплообменников с турбулизаторами и без них от расхода охлаждающей жидкости. В ходе анализа полученных функциональных зависимостей было установлено, что гидравлическое сопротивление алюминиевых теплообменников с турбулизаторами по сравнению с теплообменниками без турбулизаторов выше на 9,2 %, теплоотдача – на 8,4 %, а коэффициент теплопередачи – на 9,7 %. На основании этого сделан вывод, что применение турбулизаторов в алюминиевых теплообменниках повышает эффективность системы охлаждения сельскохозяйственных тракторов.

Ключевые слова: радиатор, теплоотдача, турбулизатор, сельскохозяйственные трактора, гидравлическое сопротивление

### ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее развитие и повышение эффективности сельского хозяйства предполагает техническое переоснащение сельскохозяйственного производства. В решении этой задачи важное место отводится развитию тракторного парка. В этой связи большое значение имеет дальнейшее повышение энергонасыщенности и экономичности выпускаемых сельскохозяйственных тракторов. При создании сельскохозяйственных тракторов повышенной мощности увеличивается тепловая напряженность различных функциональных систем. Возникает необходимость обеспечивать отвод в окружающую среду значительного количества теплоты от двигателя, трансмиссии и гидравлической системы. Для решения этой задачи применяются системы охлаждения различной конструкции, основным элементом которых является теплообменник [5]. В настоящее время в системах охлаждения сельскохозяйственных тракторов в основном используют медные и алюминиевые теплообменники, но существует тенденция полного перехода на алюминиевые теплообменники [1], вследствие того что алюми-

ний и его сплавы отличаются низкой плотностью (в 3 раза легче стали и в 3,5 – медных сплавов), высокими удельной прочностью и теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью, высокой способностью к поглощению удара, низкой стоимостью и недефицитностью.

Исследованиям применения алюминиевых теплообменников в системах охлаждения сельскохозяйственных тракторов, комбайнов и автомобилей посвящены работы В. В. Буркова, А. И. Индейкина, Л. А. Аверкина, Б. И. Лебедева, Х. Х. Мухаметшина, М. Е. Иовлева, Г. А. Курмашева, А. Н. Фомченко, Г. А. Аманова и ряда других отечественных [1], [2], [5], [6], [10] и зарубежных авторов [7], [8], [9]. В этих работах с позиций системного подхода описываются наиболее перспективные направления повышения эффективности работы алюминиевых теплообменников, их конструкции и типы. Но при этом вопрос влияния турбулизации охлаждающей жидкости на параметры теплообменника сельскохозяйственных тракторов на настоящий момент исследован недостаточно, что является существенной проблемой, требующей решения. Известно [3],

[4], [6], что турбулизация охлаждающей жидкости внутри теплообменника позволяет повысить ее теплоотдачу. Для создания турбулизации охлаждающей жидкости внутри трубок теплообменника монтируют пластиковые винтообразные турбулизаторы, которые образуют завихрения потока охлаждающей жидкости в теплообменнике, благодаря этому она быстрее отдает тепло.

Цель настоящей работы – исследование влияния турбулизации охлаждающей жидкости на параметры теплообменника сельскохозяйственных тракторов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование влияния турбулизации охлаждающей жидкости на параметры теплообменника сельскохозяйственных тракторов производилось на тепловой аэродинамической трубе (ТАТ) в научно-исследовательской лаборатории Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. Сущность исследования заключалась в сравнительных испытаниях алюминиевых теплообменников сельскохозяйственных тракторов без турбулизаторов и с турбулизаторами в виде витых вставок на основе термостойкой пластмассы. Алюминиевые теплообменники без турбулизаторов и с турбулизаторами поочередно устанавливались в ТАТ (рис. 1).

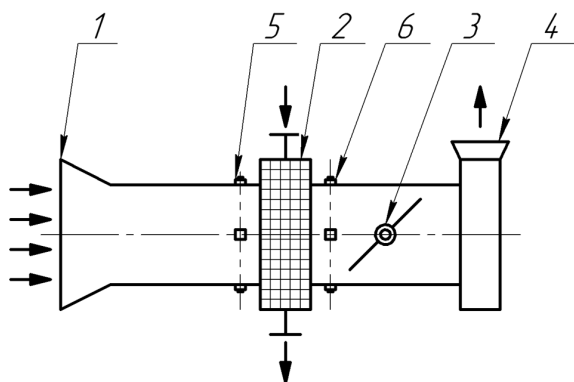


Рис. 1. Схема тепловой аэродинамической трубы:  
1 – заборное устройство, 2 – теплообменник, 3 – регулирующая заслонка, 4 – центробежный вентилятор,  
5, 6 – сечения ТАТ до и после теплообменника

Воздух через входное заборное устройство 1, поверхность которого отполирована и покрыта лаком, поступает в канал прямоугольного сечения размером  $375 \times 150$  мм, проходит через сердцевину теплообменника 2, установленного в разьеме аэротрубы, и далее через регулировочную заслонку 3 направляется к центробежному вентилятору 4 типа ВД-9. Ртутные (типа ТЛ-4) и электротермометры (с датчиками температуры на терморезисторах СТЗ-14 с измерительным блоком и индикаторами для дистанционного фиксирования температуры с точностью 0,1 К) располагаются перед входом в ТАТ и в сечениях 5 и 6. Все поверхности ТАТ покрыты слоем те-

плоизоляции толщиной до 50 мм, все соединения надежно уплотнены от протечек воздуха.

Порядок проведения исследования был следующий: в теплообменник подавалась охлаждающая жидкость (вода), нагретая до температуры  $t_w' = 85 \dots 95$  °С, и в соответствии с планом эксперимента задавался определенный расход воды  $G_w$  (л/мин). По плану эксперимента значения расхода воды варьировали в диапазоне  $60 \dots 120$  л/мин с шагом 20 л/мин. Далее запускался центробежный вентилятор. По достижении стабильности показаний электротермометров снимались показания с контрольно-измерительных приборов. В протоколе испытаний регистрировались следующие параметры: температура воды на входе  $t_w'$  и выходе  $t_w''$ ; воздуха на входе  $t_l'$  и выходе  $t_l''$ ; площадь поверхности охлаждения теплообменника по воздуху  $F_l$ .

Для получения необходимой стабильности показаний длительность исследования при каждом значении расхода воды составляла 20 мин. Расчетными параметрами для построения характеристик теплообменника являлись: гидравлическое сопротивление  $\Delta P_w$  (кПа), теплоотдача (по воде)  $Q_w^{60}$  (кВт), коэффициент теплопередачи  $K$  (Вт/(м<sup>2</sup> × К)). Обработка опытных данных производилась по формулам, разработанным в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории СПбГАУ [1], [6]:

Средняя температура воздуха на входе:

$$\bar{t}_l' = (t_l' + t_l'') / 2, \text{ К.}$$

Температурный напор по воздуху:

$$\Delta t_l = t_l'' - \bar{t}_l', \text{ К.}$$

Средняя температура воды:  $\bar{t}_w' = (t_w' + t_w'') / 2, \text{ К.}$

Температурный напор воды:  $\Delta t_w = (t_w' - t_w''), \text{ К.}$

Плотность воды при данных условиях:

$$\gamma_w = 1021,25 - 0,625 \times t_w', \text{ кг/м}^3.$$

Средняя весовая теплоемкость воды при постоянном давлении:

$$C_{pw} = 0,000133 \times \bar{t}_w' + 0,9967, \text{ Дж/(кг} \times \text{К).}$$

Теплоотдача от воды к поверхности теплообменника:

$$Q_w = 0,06 \times \gamma_w \times C_{pw} \times G_w \times \Delta t_w, \text{ кВт.}$$

Температурный напор на входе:  $\Delta t_i = t_w' - \bar{t}_l', \text{ К.}$

Теплоотдача (по воде):

$$Q_w^{60} = 60 \times Q_w / (1,163 \times 10^{-3} \times \Delta t_i), \text{ кВт.}$$

Среднелогарифмическая разность температур:

$$\Delta t_{\ln} = (t_w'' - \bar{t}_l') - (t_w' - t_l'') / \ln [(t_w'' - \bar{t}_l') - (t_w' - t_l'')], \text{ К.}$$

Средний коэффициент теплопередачи поверхности охлаждения теплообменника:

$$K = 1,163 \times Q_w / (\Delta t_{\text{ln}} \times F_l), \text{ Вт/ (м}^2 \times \text{К)}.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных расчетов были получены выборки данных изменения гидравлического сопротивления, теплоотдачи (по воде) и коэффициента теплопередачи в зависимости от расхода воды теплообменников с турбулизаторами и без них. Для полученных данных произведена статистическая обработка общепринятыми методами математической статистики для доверительной вероятности 0,9. Результаты представлены в виде графиков характеристик теплообменников на рис. 2–4.

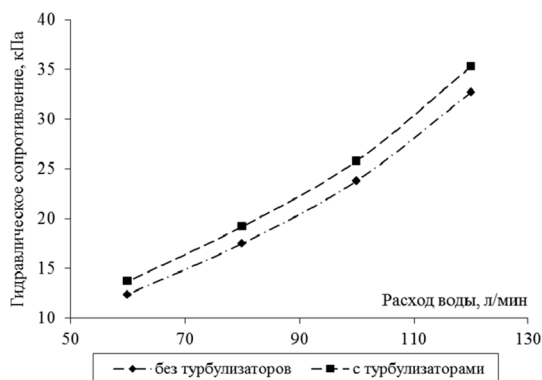


Рис. 2. График изменения гидравлического сопротивления в зависимости от расхода воды теплообменников с турбулизаторами и без турбулизаторов

Представленные на графике (см. рис. 2) экспериментальные кривые можно аппроксимировать следующими полиномиальными зависимостями:

а) теплообменник без турбулизаторов –  
 $\Delta P_w = 0,0024 \times G_w^2 - 0,092 \times G_w + 9,41$

с достоверностью  $R^2 = 0,99$ ;

б) теплообменник с турбулизаторами –  
 $\Delta P_w = 0,0025 \times G_w^2 - 0,093 \times G_w + 10,37$

с достоверностью  $R^2 = 0,99$ .

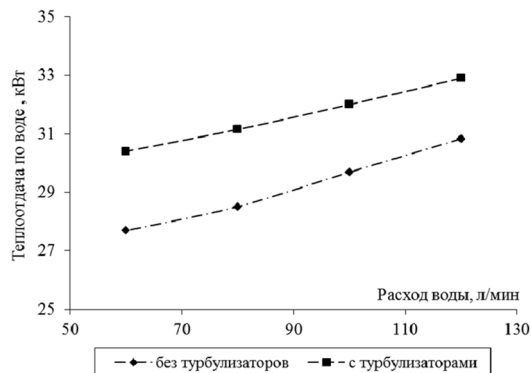


Рис. 3. График изменения теплоотдачи по воде в зависимости от расхода воды теплообменников с турбулизаторами и без турбулизаторов

Представленные на графике (см. рис. 3) экспериментальные кривые можно аппроксимировать следующими полиномиальными зависимостями:

а) теплообменник без турбулизаторов –  
 $\Delta P_w = 0,0002 \times G_w^2 + 0,017 \times G_w + 25,93$

с достоверностью  $R^2 = 0,99$ ;

б) теплообменник с турбулизаторами –  
 $\Delta P_w = 0,0001 \times G_w^2 + 0,025 \times G_w + 28,57$

с достоверностью  $R^2 = 1,00$ .

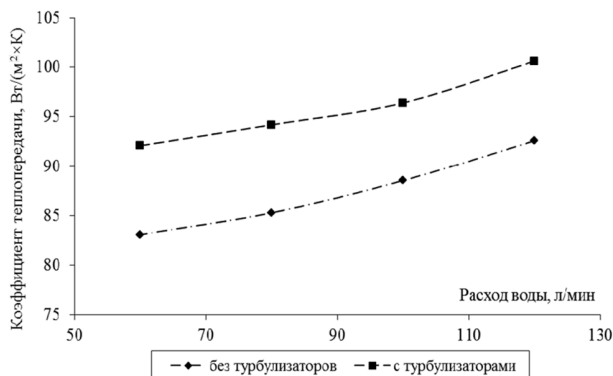


Рис. 4. График изменения коэффициента теплопередачи в зависимости от расхода воды теплообменников с турбулизаторами и без турбулизаторов

Представленные на графике (см. рис. 4) экспериментальные кривые можно аппроксимировать следующими полиномиальными зависимостями:

а) теплообменник без турбулизаторов –  
 $\Delta P_w = 0,0012 \times G_w^2 - 0,051 \times G_w + 81,94$

с достоверностью  $R^2 = 1,00$ ;

б) теплообменник с турбулизаторами –  
 $\Delta P_w = 0,0013 \times G_w^2 - 0,098 \times G_w + 93,34$

с достоверностью  $R^2 = 0,99$ .

Анализируя представленные на графиках характеристик теплообменников данные и полученные зависимости, можно отметить, что с увеличением расхода воды полиномиально возрастает гидравлическое сопротивление, теплоотдача (по воде) и коэффициент теплопередачи как теплообменников с турбулизаторами, так и без турбулизаторов. Гидравлическое сопротивление теплообменников с турбулизаторами по сравнению с теплообменниками без турбулизаторов возросло в среднем на 9,2 %, теплоотдача – на 8,4 %, коэффициент теплопередачи – на 9,7 %.

Полученные нами результаты согласуются с результатами испытаний алюминиевых теплообменников фирмы LUZAR, проведенных ОАО «Арзамасский машиностроительный завод» (протоколы испытаний № 352, 353 и 354 от 18.09.2012): теплоотдача теплообменников с турбулизаторами во всех трубках выше на 10 %, чем теплообменников без турбулизаторов в трубках [10].

Повышение гидравлического сопротивления ведет к дополнительным затратам энергии на его

преодоление, что, в свою очередь, приводит к повышению расхода топлива сельскохозяйственных тракторов. Но увеличение теплоотдачи и коэффициента теплопередачи ведет к существенному повышению эффективности отвода в окружающую среду тепла, что компенсирует гидравлические потери, а также позволяет снизить размеры

и массу теплообменника, тем самым снижая его расход топлива и стоимость.

На основании вышеизложенного мы полагаем, что применение турбулизаторов в алюминиевых теплообменниках является целесообразным и позволит повысить эффективность системы охлаждения сельскохозяйственных тракторов.

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 годы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков В. В. Алюминиевые теплообменники сельскохозяйственных и транспортных машин. Л., 1985. 239 с.
2. Бурков В. В., Индейкин А. И. Автотракторные радиаторы. Л.: Машиностроение, 1978. 216 с.
3. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 386 с.
4. Узakov Г. Н., Ибрагимов У. Х., Шомуратова С. М., Рuzикулов Г. Обобщение опытных данных по гидравлическому сопротивлению в трубках теплообменников с локальными турбулизаторами // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 144–146.
5. Фомченко А. Н. Улучшение показателей эффективности блочных систем охлаждения при эксплуатации тракторов и автомобилей путем разработки метода и средств дифференциальной оценки теплообменников: Дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 173 с.
6. Чернышев Л. А. Повышение эффективности тракторных теплообменников путем использования алюминиевых радиаторов, изготовленных методом подрезки и отгибки оребрения: Дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 1993. 171 с.
7. Alam T., Saini R. P., Saini J. S. Use of turbulators for heat transfer augmentation in an air duct – A review // Renewable Energy. 2014. № 62. P. 689–715.
8. Bai S., Li G., Zhang L., Yang B. Design and test of cold rectifying fin tubular radiator for tractor // Nongye Jixie Xuebao / Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2006. № 37 (1). P. 37–39.
9. Kuang W. H., Chen B. B. Numerical simulation and technical study of radiator aluminum extrusion // Journal of Applied Sciences. 2013. № 13 (21). P. 4411–4419.
10. Lada-forum.ru (2013). Available at: <http://www.lada-forum.ru/index.php?showtopic=47815&page=116>

Chernyaev L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Gavrilov T. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF FLUID TURBULIZATION ON THE PARAMETERS OF THE HEAT EXCHANGER

This article is devoted to the research of the influence of cooling fluid turbulization inside the agricultural tractors aluminium heat exchangers on the efficiency of their heat emission. To create the cooling fluid turbulization inside the aluminium heat exchangers tubes plastic helical turbulator which forms a cooling fluid turbulence in the heat exchanger are mounted. The study was carried out at heat wind tunnel in the research laboratory at St. Petersburg State Agrarian University. The essence of the study was to test comparatively agricultural tractors aluminum heat exchangers without turbulators and with turbulators in the form of twisted inserts on the basis of heat-resistant plastic. According to the study the authors obtained the functional dependence of hydraulic resistance, heat emission and heat transfer coefficient of aluminium heat exchangers with turbulators and without on the cooling fluid rate. Analyzing the functional dependence, the authors found out that the hydraulic resistance of the aluminum heat exchangers with turbulators as compared to the heat exchangers without turbulators is 9,2%, the heat emission 8,4%, and heat transfer coefficient 9,7% higher. On the basis of this, the authors consider that the application of the turbulator in aluminium heat exchangers increases the efficiency of the cooling system of agricultural tractors.

Key words: radiator, heat emission, turbulator, agricultural tractors, hydraulic resistance

#### REFERENCES

1. Burkov V. V. *Alyuminiyevye teploobmenniki sel'skokhozyaystvennykh i transportnykh mashin* [Aluminum heat exchangers of the agricultural and transport machinery]. Leningrad, 1985. 239 p.
2. Burkov V. V., Indeykin A. I. *Avtotraktornye radiatory* [Autotractor radiators]. Leningrad, 1978. 216 p.
3. Kutateladze S. S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie* [Heat transfer and hydrodynamic resistance]. Moscow, 1990. 386 p.
4. Uzakov G. N., Ibragimov U. Kh., Shomuratova S. M., Ruzikulov G. Generalization of the experimental data on the hydraulic resistance in the heat exchanger tubes with local turbulizers [Obobshchenie opytnykh dannykh po gidravlicheskomu soprotivleniyu v trubkakh teploobmennikov s lokal'nymi turbulizatorami]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2013. № 10. P. 144–146.
5. Fomchenko A. N. *Uluchshenie pokazateley effektivnosti blochnykh sistem okhlazhdeniya pri ekspluatatsii traktorov i avtomobiley putem razrabotki metoda i sredstv differentsial'noy otsenki teploobmennikov*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of the efficiency of block cooling systems performances at operation of tractors and cars by development of the differential assessment of heat exchangers method and means. Ph. D. tech. sci. diss]. St. Petersburg, 1999. 173 p.
6. Chernyaev L. A. *Povyshenie effektivnosti traktornykh teploobmennikov putem ispol'zovaniya alyuminiyevykh radiatorov, izgotovlennykh metodom podrezki i otgibki orebreniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving of the heat exchangers efficiency by using tractor aluminum radiators fabricated by cutting the fins and the flange. Ph. D. tech. sci. diss]. St. Petersburg, 1993. 171 p.
7. Alam T., Saini R. P., Saini J. S. Use of turbulators for heat transfer augmentation in an air duct – A review // Renewable Energy. 2014. № 62. P. 689–715.
8. Bai S., Li G., Zhang L., Yang B. Design and test of cold rectifying fin tubular radiator for tractor // Nongye Jixie Xuebao / Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2006. № 37 (1). P. 37–39.
9. Kuang W. H., Chen B. B. Numerical simulation and technical study of radiator aluminum extrusion // Journal of Applied Sciences. 2013. № 13 (21). P. 4411–4419.
10. Lada-forum.ru (2013). Available at: <http://www.lada-forum.ru/index.php?showtopic=47815&page=116>

Поступила в редакцию 09.01.2014