

# Снижение гидравлического сопротивления трубных теплообменных аппаратов с продольными турбулизаторами пограничного слоя

## Reduction of hydraulic resistance tube heat exchangers with longitudinal boundary layer turbulizers

**Ключевые слова:** теплообменник – heat exchanger; гидравлическое сопротивление – hydraulic resistance; оперечное обтекание – the cross-streamlined flow; турбулентность – turbulence; турбулизатор – turbulizer; пограничный слой – boundary layer.

Рассмотрена возможность снижения гидравлического сопротивления поперечно-обтекаемых гладко-трубных пучков теплообменников путем искусственной турбулизации пограничного слоя на трубках. Приведены результаты экспериментального исследования, показывающие снижение гидравлического сопротивления пучков в зависимости от диаметра турбулизаторов.

The possibility of reducing the cross-streamlined smooth-tube bundles flow resistance of heat exchangers by artificial turbulence in the boundary layer on the tubes is discussed. The results of experimental studies show the reduction of hydraulic resistance of beams, depending on the diameter of the turbulizer.

### ВВЕДЕНИЕ

Во многих теплотехнических устройствах широко используются трубные теплообменные поверхности. Любая конструкция теплообменника должна обеспечивать подвод или отвод заданного количества теплоты при минимальных затратах на перемещение теплоносителя, т.е. обладать минимальным гидравлическим сопротивлением. На гидравлические характеристики трубных теплообменных аппаратов во многом влияет наличие пограничного слоя на поверхности трубок и его отрыв от этой поверхности при обтекании тела, вызывающий значительные затраты энергии потока на вихреобразование в турбулентной области за трубкой.

Существует достаточно много способов управления отрывом пограничного слоя. Наиболее известные

### СТОЯКИН / СТОУАКИН G.

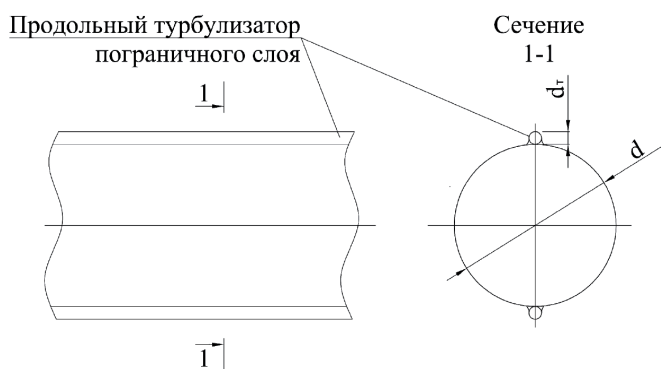
#### Григорий Михайлович

(pppnpv@yandex.ru)  
аспирант физического факультета  
Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова,  
Москва

способы, такие как отсасывание, приведение стенки в движение в сторону течения, ее охлаждение, ламинарирование профиля обтекаемого тела, увеличение скорости пограничного слоя, вдувание другого газа, применение скользящего разряда – технологически сложно осуществимы для поперечно-обтекаемых гладкотрубных пучков, используемых в теплопередающих системах энергетического и климатического оборудования (котлы-утилизаторы, парогазовые установки, калориферы вентиляционных установок, агрегаты воздушного отопления).

### МОДЕЛЬ

Одним из перспективных способов управления отрывом гидравлического пограничного слоя можно считать использование искусственной турбулизации слоя, приводящей к эффекту кризиса сопротивления. Этот эффект состоит в том, что при высоких значениях критерия Рейнольдса ( $Re \approx 1,5 \cdot 10^5$ ) коэффициент гидравлического сопротивления обтекаемого тела резко падает. Как показал Л. Прандтль [1], это объясняется тем, что при переходе через определенную скорость значительно изменяется характер явлений в пограничном слое. Ламинарный пограничный слой делается неустойчивым и турбулизуется. Линия отрыва смещается вниз по течению жидкости и турбулентный слой за телом сужается, что приводит к уменьшению силы сопротивления. При обтекании гладкотрубных пучков в теплообменном оборудовании значения числа Рейнольдса, как правило, значительно ниже 105. Исследования Л. Прандтля для одиночных неоребранных скругленных тел показали, что искусственно турбули-



**Рис. 1.** Схема установки продольных турбулизаторов. Высота турбулизатора  $dm$ . Турбулизатор установлен на трубках диаметра  $d$  вблизи точки отрыва гидравлического пограничного слоя

зируя пограничный слой, и при меньших значениях критерия Рейнольдса можно достичь того же эффекта кризиса сопротивления и тем самым снизить гидравлическое сопротивление обтекаемого тела. Представляется целесообразным применить данный способ для смещения точки отрыва пограничного слоя от поверхности трубок для поперечнообтекаемых пучков. Реализовать его можно, установив на трубках вблизи точки отрыва слоя продольные турбулизаторы гидравлического пограничного слоя (схема установки приведена на рис. 1).

Высота турбулизатора  $dm$  не должна превосходить толщину пограничного слоя  $\delta$ , определяемую из следующего соотношения:

$$\delta = \sqrt{42,88 \frac{\nu}{U^6} \int_0^x U^5 dx},$$

где  $U$  — скорость на границе пограничного слоя,  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $x$  — расстояние от передней точки трубки по потоку до точки отрыва гидравлического пограничного слоя [2]. Сопротивление можно характеризовать в относительных единицах — числах Эйлера ( $Eu$ ).  $Eu$  — один из критериев подобия, характеризующий отношение между силами давления на единичный объем жидкости (или газа) и инерционными силами.

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2},$$

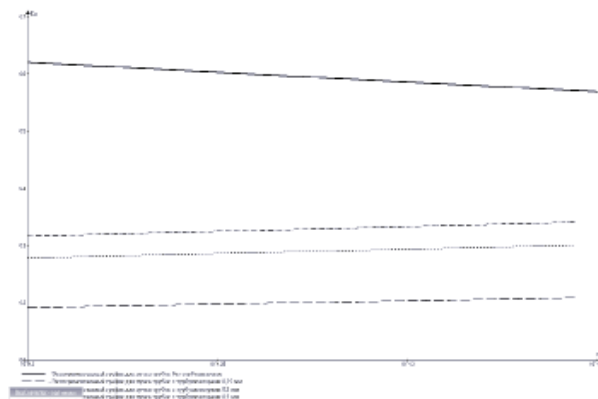
где  $\rho$  — плотность,  $\Delta p$  — перепад давления, расходуемый на преодоление гидравлического сопротивления,  $w$  — скорость.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные исследования, проведенные на поперечнообтекаемых пучках, составленных из гладких трубок  $d = 14$  мм, с турбулизаторами размером  $dm = 0,15-1,1$  мм, подтвердили возможность практического применения предложенного способа. При исследовании сравнивалось гидравлическое сопротивление гладкотрубного семирядного пучка с шахматным расположением трубок и аналогичного по геометрии пучка с трубками, оснащенными турбулизаторами. Отклонение опытных точек от аппроксимирующей зависимости не превышало 15%. Результаты исследования, приведенные на рис. 2, показали, что на пучках с установленными турбулизаторами, размер которых меньше толщины пограничного слоя, характеристики течения в области чисел Рейнольдса, соответствующих докритическому режиму, меняются.

При исследовании сравнивалось гидравлическое сопротивление гладкотрубного семирядного пучка с шахматным расположением трубок и аналогичного по геометрии пучка с трубками, оснащенными турбулизаторами. Зависимость сопротивления (критерия Эйлера) от числа Рейнольдса, или  $Eu = f(Re)$ : прямая линия — в случае отсутствия турбулизаторов, штриховой пунктир (— —) соответствует размерам турбулизаторов 0,25 мм (длинный пунктир) и 0,3 мм (короткий пунктир), штрих-пунктир (— · — · —) соответствует размерам турбулизаторов 0,5 мм.

Зависимость критерия Эйлера от числа Рейнольдса  $Eu = f(Re)$  приобретает характер, более близкий критическому режиму обтекания,



**Рис. 2.** Экспериментальные исследования, проведенные на поперечнообтекаемых пучках, составленных из гладких трубок диаметром  $d = 14$  мм, с турбулизаторами  $dm = 0,15-1,1$  мм.с

при котором критерий  $Ei$  не зависит от критерия  $Re$ . Значения  $Ei$  при одних и тех же значениях  $Re$  меньше, чем для пучка без турбулизаторов, и зависят от соотношения толщины пограничного слоя  $\delta$  и размеров  $dm$  турбулизатора —  $\delta/dm$ .

### ВЫВОДЫ

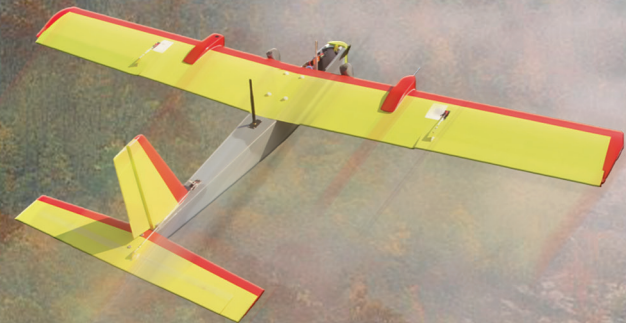
Результаты исследования показали, что на пучках с установленными турбулизаторами, размер которых меньше толщины пограничного слоя, характеристики течения меняются. Возможен переход к критическому режиму при более низких числах Рейнольдса.

### Литература

1. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. — М.: РХД, 2002.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. — М.: Наука, 1982.

**Комплекс дистанционного мониторинга местности и построения изображений поверхности земли на базе**

**БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА (БПЛА)**



■ аэрофотосъемка, тепловизионная съемка

■ видеонаблюдение за оперативной обстановкой

■ передача информации в реальном

масштабе времени

■ обработка данных с помощью СПО и построение

изображений поверхности земли

(фотопланы, 3D-модели)



ЗАО «Институт телекоммуникаций»  
194100, Санкт-Петербург,  
ул. Кантемировская, д. 5/5  
Телефон: (812) 740-77-07  
Факс: (812) 740-77-08  
E-mail: office@itain.spb.ru