

ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 3814

(13) U

(46) 2007.08.30

(51) МПК (2006)

F 28D 1/00

F 28D 7/00

F 28D 15/00

(54)

ТРУБНЫЙ ПУЧОК

(21) Номер заявки: u 20070108

(22) 2007.02.15

(71) Заявитель: Учреждение образования
"Белорусский государственный тех-
нологический университет" (ВУ)

(72) Авторы: Кунтыш Владимир Борисович;
Санкович Евгений Савельевич (ВУ)

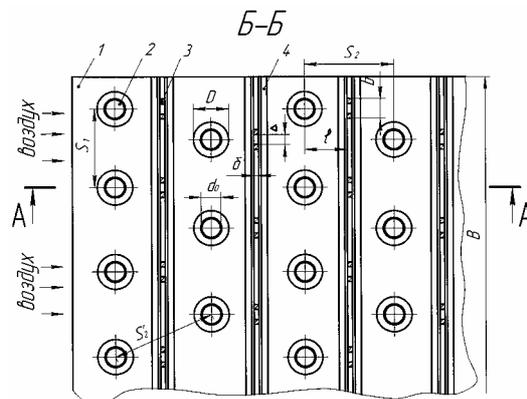
(73) Патентообладатель: Учреждение обра-
зования "Белорусский государственный
технологический университет" (ВУ)

(57)

1. Трубный пучок прямоугольного фронтального сечения, содержащий трубные решетки и набор шахматно расположенных в них с заданными поперечным S_1 и продольным S_2 шагами круглых труб с поперечными кольцевыми или спиральными ребрами или круглых гладких труб, омываемых перпендикулярным продольной оси труб потоком теплоносителя, **отличающийся** тем, что за каждой трубой пучка в их кормовой стороне установлены соосно им и нормально к направлению движения потока плоские экраны высотой H , равной длине трубы между решетками, ширина b которых равна поперечному расстоянию между параллельными осями, проходящими через центры двух продольных смежных рядов шахматно расположенных за трубой вихрей, поочередно отрывающихся с ее боковых сторон и движущихся по направлению потока, при этом экраны установлены по линии, проходящей через центр первого оторвавшегося вихря и параллельной поперечной оси труб каждого ряда.

2. Трубный пучок по п. 1, **отличающийся** тем, что каждый экран по всей высоте в середине снабжен прорезью прямоугольного поперечного сечения шириной Δ .

3. Трубный пучок по п. 1, **отличающийся** тем, что в пучках из круглых гладких труб экраны устанавливаются при шаге $S_2 \geq 2d$, где d - наружный диаметр трубы, а в пучках из круглых труб с поперечными круглыми ребрами продольный шаг $S_2 > 2d_0$ при условии $(D/d_0) < 2$, где D - наружный диаметр ребра; d_0 - диаметр по основанию ребер.



Фиг. 2

4. Трубный пучок по п. 1, **отличающийся** тем, что экраны выполнены из малотеплопроводного материала, толщина δ которых удовлетворяет условию прочности на давление движущегося потока, а материал обеспечивает температурную стойкость и коррозионную устойчивость к теплоносителю.

5. Трубный пучок по п. 1, **отличающийся** тем, что отдельные экраны труб каждого ряда собираются в модули шириной B , равной ширине фронтального сечения пучка.

6. Трубный пучок по п. 1, **отличающийся** тем, что экраны устанавливаются в пучках с докритическим режимом течения потока.

(56)

1. Кунтыш В.Б., Иохведов Ф.М. Влияние относительной глубины межреберной полости на тепловую эффективность, теплообмен ребристых пучков труб и интенсификацию теплоотдачи в них // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1970. - № 4. - С. 127-136.

2. Альбом течений жидкости и газа: Пер. с англ / Сост. М. Ван-Дайк. - М.: Мир, 1986. - С. 30, 32-33, 39, 59.

3. Справочник по теплообменникам: В 2 томах. Т. 1 / Пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С. 135-142.

4. Мигай В.К., Фирсова Э.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. - Л.: Наука, 1986. - С. 8-9.

5. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб. - Киев: Альтерпресс, 2004. - С. 69-77.

6. Кирпичев М.В., Михеев М.А., Эйгенсон Л.С. Теплопередача. - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1940. - С. 116.

7. Жукаускас А.А., Улинскас Р.В., Катинас В.И. Гидродинамика и вибрация обтекаемых пучков труб. - Вильнюс: Мокслас, 1984. - С. 236-253.

8. Иохведов Ф.М., Кунтыш В.Б. О лобовом сопротивлении пучков ребристых труб, омываемых поперечным потоком воздуха // Труды Ленинградского технологического института целлюлозно-бумажной промышленности. - 1970. - Вып. 23. - С. 240-243.

9. Поспелов Д.Р. Двигатели внутреннего сгорания с воздушным охлаждением. - М.: Машиностроение, 1971. - С. 388-398.

10. Нейбургер А.Э. Интенсификация теплообмена в однорядных пучках оребренных труб // Труды НИИ санитарной техники: Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. - 1965. - С. 70-83.

11. Патент РФ 2000518 С, МПК F 23L 15/04, 1993 (прототип).

Полезная модель относится к теплообменному оборудованию, а более конкретно к рекуперативным поверхностным трубчатым теплообменникам, у которых теплоноситель обтекает вынужденным поперечным потоком трубный пучок. Широкое применение получили трубные пучки прямоугольного фронтального сечения по направлению движения теплоносителя, поверхность теплообмена которых в гидро- и аэродинамическом отношении выполнена из плохо обтекаемых (неудобно обтекаемых) тел, например круглых труб.

Поперечно обтекаемые теплоносителями гладкотрубные пучки с прямоугольной формой фронтального сечения применяются в воздухоохладителях систем комфортного и технологического кондиционирования, воздухонагревателях паровых котлов, водяных экономайзерах котлов, сжигающих твердое топливо, воздушных маслоохладителях, теплоутилизаторах бумаго- и картоноделательных машин, подогревателях топлива. Однако наибольшее распространение получили поперечно обтекаемые пучки из круглых труб, оребренных преимущественно поперечными спиральными ребрами круглой формы, чаще называемые круглоребристой поверхностью теплообмена. Оребрение осуществляется по стороне трубы с меньшим коэффициентом теплоотдачи, а это, как правило, межтрубное

пространство пучка, обтекаемое газовым (воздушным) потоком. Применение оребренных труб увеличивает коэффициент теплопередачи трубного пучка, уменьшает его габариты и массу в сравнении с гладкотрубным при передаче одинакового теплового потока. Типичными представителями рекуперативных теплообменников с такими трубными пучками являются водяные и паровые калориферы и воздухоподогреватели, водяные экономайзеры газомазутных котлов, промежуточные и концевые газо- и воздухоохладители компрессоров, воздухоохладители турбо- и гидрогенераторов, теплообменные секции аппаратов воздушного охлаждения нефтегазового комплекса и холодильных машин. В общем, это группа газожидкостных теплообменников различного функционального назначения. Затруднительно отыскать отрасль промышленности, техники и народного хозяйства, в которой не эксплуатируются такие аппараты.

Компоновка труб в пучках, как правило, шахматная. Компонировочными характеристиками пучка являются шаги труб: поперечный S_1 , продольный S_2 , диагональный S_2' и число поперечных рядов труб z по направлению движения теплоносителя. При одинаковых затратах мощности на прокачку теплоносителя через межтрубное пространство коэффициенты теплоотдачи шахматных пучков на 25...40 % [1] больше теплоотдачи коридорных. Следовательно, шахматные пучки являются энергетически более выгодными по сравнению с коридорными, что предопределило их большее применение.

При поперечном обтекании одиночной гладкой трубы возникает при числе Рейнольдса $Re = 26$ отрыв пограничного слоя потока от стенки с образованием за трубой двух симметрично расположенных неподвижных вихрей (фото 42) [2]. При достижении скорости набегающего на трубу потока, соответствующей интервалу числа Рейнольдса $30...40 < Re < 80...90$, неподвижные за трубой вихри начинают вытягиваться по направлению движения в два параллельных ряда с их шахматным расположением (фото 46, 48) [2] и возникает начальный режим течения Кармана [3] с ламинарным неустойчивым следом потока за трубой. В случае достижения потоком интервала $80...90 < Re < 100...300$ [3] наблюдается периодический отрыв от боковых стенок трубы вихрей и сбегание их (фото 96) [2] с формированием устойчивой вихревой дорожки Кармана, ширина которой зависит от диаметра трубы (цилиндра). В интервале $100...300 < Re < 100000...130000$ наступает докритический режим течения около круглой трубы. Отрыв ламинарного пограничного слоя потока происходит на угловом расстоянии порядка 80° от лобовой критической точки трубы, соблюдается периодичность отрыва и сбегания вихрей и наличие ламинарного потока в следе за трубой, однако на некотором расстоянии от трубы дорожка Кармана теряет устойчивость, происходит распад картины течения на мелковихревую структуру. Поперечно обтекаемые пучки труб промышленных теплообменников эксплуатируются преимущественно в интервале $Re \approx 3000...70000$.

Периодичность отрыва вихрей определяется числом Струхалия $Sh = fd/w$, где f - частота отрыва вихрей с одной стороны трубы; d - наружный диаметр трубы, м; w - скорость потока, м/с. Для одиночных труб - это скорость набегающего потока, для пучков труб - это скорость в наиболее узком проходном сечении. Для одиночных труб отрыв вихрей определяется значением $Sh = 0,21$. При поперечном обтекании пучков труб число Sh зависит от расположения труб (шахматное или коридорное) и шага их в решетке.

Обтекание гладких труб в шахматных пучках (фото 60) [2] и данные [4] указывают на такую же картину образования вихрей. Это характерно и для круглоребристых труб [5]. Анализ картины поперечного обтекания круглых гладких и ребристых труб в шахматных пучках показывает, что наиболее полное развитие дорожка Кармана имеет место в гладкотрубных пучках с продольным шагом $S_2 \geq 2d$, а в пучках ребристых труб при $S_2 > 2d_0$, при этом $D/d_0 < 2$. Здесь D - наружный диаметр ребра, d_0 - диаметр трубы по основанию ребер.

Следствием отрыва пограничного слоя от боковой поверхности трубы является вихреобразование и появление несимметричности относительно поперечной оси в распределении давления по периметру трубы. Давление потока на стенку, начиная от передней критической (лобовой) точки с $\beta = 0^\circ$, где имеет максимальную величину, убывает, достигая минимума недалеко от миделевого сечения, то есть приблизительно там, где отрывается ламинарный пограничный слой в докритическом режиме течения. С дальнейшим увеличением угла β давление сначала возрастает, а затем на протяжении всей кормовой области остается приблизительно постоянным, при этом, начиная с $\beta = 40^\circ$ и далее в направлении движения, вся часть трубы находится под пониженным давлением (разрежением) [6].

Таким образом, асимметричность распределения давления по периметру трубы является причиной наличия равнодействующей P_d сил давления, приложенных к ее поверхности. Кроме этой силы труба испытывает равнодействующую сил трения $P_{тр}$. Полная сила сопротивления трубы движению потока равна:

$$P = P_d + P_{тр}. \quad (1)$$

Исследования показывают [6], что в докритическом режиме сопротивление давления составляет 90... 95 % полного сопротивления движению. Одним из доминирующих факторов, оказывающих влияние на величину P_d , является ширина вихревой дорожки Кармана. При смещении точки отрыва пограничного слоя от поверхности трубы вниз по потоку ширина дорожки сужается, улучшается обтекаемость трубы, распределение давления выравнивается, уменьшается его асимметричность и снижается величина P_d при сохранении неизменного значения $P_{тр}$. Значит необходимо меньше подводить извне энергии к потоку, что осуществляется побуждающими устройствами (вентиляторами, насосами, компрессорами) для преодоления сопротивления движению теплоносителя. По существу отрыв пограничного слоя, сопровождающийся вихреобразованием, требует постоянного подвода энергии к движущемуся потоку. По опытам и расчетам акад. Жукаускаса А.А. с соавторами [7], на образование первого вихря затрачивается до 67 % подводимой энергии.

Изложенная картина поперечного обтекания гладкой трубы и сообщенные количественные характеристики имеют место и для труб в шахматных пучках [7].

Переход от круглых гладких труб к круглорребристым не приводит к принципиальным изменениям в процессе обтекания их поперечным потоком. По нашим опытам [8] и обширным исследованиям [7], картина поперечного обтекания потоком круглорребристых труб в шахматных пучках качественно подобна обтеканию гладких труб в пучках идентичной компоновки. Но имеются количественные различия. Доля силы трения $P_{тр}$ несколько больше и составляет 14÷20 % от полной P силы сопротивления. В этом случае коэффициент сопротивления давления (формы), часто именуемый коэффициентом лобового сопротивления, равен 86÷80 % от полного сопротивления трубы (пучка).

Изложенное наглядно показывает, что для снижения гидравлического (аэродинамического) сопротивления поперечно обтекаемых пучков необходимо применять такие технические решения, итогом которых является, прежде всего, уменьшение силы давления, то есть коэффициента сопротивления давления труб пучка. Отрыв пограничного слоя вязкой жидкости (газа) от плохо обтекаемых тел и формирование вихрей - это неотъемлемое физическое явление гидродинамики вынужденного потока. Полностью устранить это явление в области наибольшего практического интереса по числу Re для теплообменников невозможно. Однако управлять этим явлением возможно поиском и применением соответствующих конструктивных элементов по задержке раннего отрыва потока от поверхности и разрушения первых оторвавшихся вихрей, что не потребует в последующем подвода внешней энергии на сохранение их формы и сообщения движения в направлении потока.

Поток внутри области, сформировавшейся после его отрыва от трубы, называемой аэродинамическим следом и ограниченной внешними контурами движущихся вихрей, ха-

рактируется слабой интенсивностью циркуляции, низкой скоростью и замедленным обменом количеством движения, а значит и энергией с основной средой вне следа.

При наличии теплообмена температура потока здесь выше по сравнению с ней вне следа. Эти факторы оказывают неблагоприятное влияние на интенсивность местной теплоотдачи с части поверхности трубы, расположенной в следе. Локальные коэффициенты теплоотдачи круглоребристых труб в $1,4 \div 2,5$ раза [5] меньше в сравнении с ними для участков поверхности трубы, расположенных вне отрывной области. Теплоотдающая поверхность, находящаяся в области аэродинамического следа, заключена в "вихревой мешок" со всеми негативными его параметрами. Для увеличения средней теплоотдачи пучка следует интенсифицировать теплоотдачу части поверхности, расположенной в этой области.

При докритическом режиме течения потока, характерном для подавляющего числа рекуперативных теплообменников, вследствие поочередного отрыва от каждой из труб то с одной, то с другой стороны вихрей и образования за ними вихревых дорожек, начинают действовать на трубы знакопеременные гидродинамические силы, которые возбуждают вибрации труб, закрепленных в трубных решетках. Следовательно, в докритической области течения потока имеет место так называемое вихревое возбуждение труб, возникающее исключительно в процессе формирования и отрыва вихрей от труб пучка.

При поперечном обтекании труб газообразным потоком в этой области течения возникает акустическое возбуждение вибрации, при которой акустические частоты вибрируемых труб сопровождаются высоким уровнем шума (аэродинамический шум). Аэродинамический шум оказывает вредное влияние на психическое состояние, находящихся лиц в поле действия его, снижается производительность труда. Шум непрерывен, а уровень в значительной мере зависит от размеров (протяженности) вихревой дорожки Кармана. Он неотъемлемая часть крупных вентиляционных систем и систем кондиционирования, несмотря на принимаемые меры по требованиям санитарных норм охраны труда.

Как появление вибрации труб от их вихревого возбуждения, так и акустический шум устранить полностью невозможно, но соответствующими новыми конструкторскими решениями по трубным пучкам, направленными в первую очередь на нарушение периодичности отрыва вихрей, их частоты и разрушение вихревых дорожек Кармана за трубами или изменения скоростного режима эксплуатации теплообменника, а последнее не всегда возможно, но снизить их значения до допустимых (безопасных) величин возможно.

Частота f отрыва вихрей с одной стороны трубы, определяемая числом Струхала Sh , для поперечно обтекаемых пучков зависит от относительных шагов труб: поперечного $\sigma_1 = S_1/d$, продольного $\sigma_2 = S_2/d$. В ребристых пучках вместо d подставляем d_0 . Для шахматных гладкотрубных пучков расчет значений Sh выполняют по уравнениям [7]. Для пучков из круглоребристых труб это явление изучено недостаточно, расчетные уравнения отсутствуют. Значение Sh назначают на $5 \div 25$ % больше, чем для гладкотрубного пучка. В гладкотрубных пучках интервал $Sh \approx 0,2 \div 0,45$.

Отстраивая собственную частоту колебаний труб от частоты отрыва вихрей, можно уменьшить амплитуду и избежать резонансного явления. При уменьшении подвода энергии к вихрям также снижается амплитуда вибрации во времени.

Известно техническое решение [9] по улучшению обтекаемости и уменьшению ширины вихревой дорожки Кармана применительно к круглым цилиндрам с поперечными ребрами для двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением. Одиночные цилиндры обтекались перпендикулярным потоком охлаждающего воздуха. На двигателях возможна однорядная компоновка ребристых цилиндров. Теплоаэродинамические исследования выполнены на цилиндрах с наружным диаметром ребра $D > 80$ мм при высоте $H < 300$ мм. Эти размеры характерны для большинства ДВС.

Коэффициенты теплоотдачи ребристого цилиндра ДВС с дефлектором оптимальных геометрических размеров возросли в $1,86 \div 3,15$ раза по сравнению с недефлектированным

(базовым) цилиндром при одинаковой затрате мощности на подачу охлаждающего воздуха. Это можно объяснить уменьшением размеров вихревого мешка с кормовой стороны цилиндра и снижением сопротивления давления. Уменьшилась неравномерность в распределении температуры по окружности ребра.

Однако данное эффективное конструкторское решение, апробированное и нашедшее производственное применение на ДВС, имеет ряд принципиальных ограничений, препятствующих его использованию в рекуперативных трубчатых теплообменниках. Количество труб в пучке составляет от одного десятка до нескольких, а часто и более, а число цилиндров в ДВС исчисляется в пределах 10. Заключение каждой трубы в дефлектор, а это по существу кожух с входным и выходным сечениями для потока теплоносителя, увеличит металлоемкость и весьма существенно стоимость теплообменника, так как дефлектор представляет сложную конструкцию, которая должна строго определенным образом закреплена на трубе, при этом трубы длинные (более 0,5 м) по сравнению с цилиндрами ДВС. Возрастут трудозатраты на изготовление теплообменника, потребуется изменение технологии сборки трубного пучка, возникнут дополнительные сложности в обеспечении равномерного подвода потока к каждому поперечному ряду, а их в пучке бывает от двух и более, часто свыше десяти.

В работе [10] для интенсификации теплоотдачи в однорядных пучках оребренных круглых труб посредством улучшения обтекания их кормовой части применено конструкторское решение, заключающееся в установке за трубами направляющих планок. Трубы пучка обтекались перпендикулярным потоком воздуха. Сущность реализованного технического решения состоит в изменении направления движения потока за миделевым сечением трубы путем его поджатия к поверхности оребрения планками и сужения вихревых дорожек. Планки имели сплошное поперечное сечение в форме равностороннего треугольника с длиной стороны 17 мм или круга диаметром 3,5 и 10 мм. Устанавливались вплотную к оребрению, но без прикосновения к торцам ребер. Пучок состоял из стальных труб с навитыми спиральными стальными оцинкованными ребрами следующих геометрических параметров: $d_0 \times h \times s \times \Delta = 16 \times 6,65 \times 3,39 \times 0,54$ мм, коэффициент оребрения трубы $\varphi = 9,95$. Здесь h , s , Δ - соответственно высота, шаг и толщина ребра. Наружный диаметр несущей оребренной круглой трубы $d_n = d_0 = 16$ мм, а толщина ее стенки - 1,5 мм. Шаг трубы в ряду $S_1 = 30,3$ мм.

По данным исследования из направляющих планок круглого сечения наибольшая эффективность характерна для диаметра в 5 мм. В интервале массовой скорости в узком сечении пучка потока воздуха $\rho w = 3 \div 15$ кг/(м²·с) применение треугольных планок интенсифицировало в среднем теплопередачу в 1,4 раза при росте аэродинамического сопротивления системы пучок + вставки в 2 раза, а для круглых планок эти значения соответственно равны 1,26 и 1,5 раза по сравнению с исходным однорядным пучком без планок. Рост сопротивления заметно опережает прирост теплопередачи, что снижает энергетическую эффективность этого решения до 15 % для круглых планок, а для треугольных не превышает 10 %. Ожидать большего эффекта не приходится по следующим причинам.

Конструкция планок, в особенности круглой не позволяет кардинальным образом изменить в кормовой половине труб направление движения потока и сместить точку отрыва ламинарного пограничного слоя в сторону задней критической точки. Поток лишь локально поджимается к поверхности труб в сравнении с дефлектированием их, где имеет место поджатие на значительной дуге окружности. Размеры аэродинамического следа за трубами и циркуляция теплоносителя в нем ("вихревом мешке") не претерпевает существенных изменений. Отрывавшиеся от поверхности труб крупномасштабные вихри не разрушались и, для их развития и движения, требовался непрерывный подвод энергии. Слабая циркуляция потока в следе подавляет турбулентные пульсации скорости и не способствует включению в активный теплообмен теплоотдающей поверхности, находящейся в этой области потока.

Плохообтекаемые планки являются дополнительными генераторами вихрей, возрастают затраты энергии на вихреобразование и потери давления потока, итоговой характеристикой чего является рост аэродинамического сопротивления пучка. Вихревые дорожки за планками дополнительно повышают общий уровень аэродинамического шума от этой конструкции трубного пучка. Применение планок в многорядных пучках весьма проблематично вследствие сложности их размещения за трубами, снижения технологичности сборки пучка, роста металлоемкости, уменьшения производительности из-за большого дополнительного количества индивидуальных операций по монтажу планок. Выполненный анализ показывает, что повышение энергетической эффективности трубных пучков применением поджимных планок нельзя признать перспективным направлением.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемым результатам к заявленному решению является воздухонагреватель [11], содержащий шахматный пучок труб, снабженных круглыми ребрами с отогнутыми по бокам на 90° участками ребер, образующими скошенные кромки, которые расположены в каждом ребре под острым углом навстречу потоку воздуха, а угол между скошенными кромками ребер составляет $20-40^\circ$. Отношение расстояния скошенной кромки ребра от стенки трубы образующей к высоте ребра составляет $0,3 \leq b/h \leq 0,5$.

Положительным является пусть и небольшое, но безусловно возникшее сужение вихревой дорожки за каждой трубой, которое будет сопутствовать снижению аэродинамического сопротивления пучка из-за меньших потерь на вихреобразование.

Наиболее очевидными недостатками прототипа являются:

вихревая дорожка не разрушена, а следовательно не устранены причины появления вихревого возбуждения труб и аэродинамического шума;

существенно усложняется сборка пучка из-за необходимости закрепления каждой трубы в решетке пучка так, чтобы скошенные кромки ребер с обеих сторон трубы имели симметричное расположение относительно продольной оси движения потока;

размеры отогнутых скошенных кромок ребер недостаточны для реализации эффекта дефлектора, то есть поджатия потока воздуха к стенкам трубы и ребер, увеличения средней скорости воздуха в межреберных полостях кормовой половины; затягивания точки отрыва потока от боковой поверхности трубы в направлении кормовой (задней) критической точки и уменьшения вытеснения потока воздуха из полостей кормовой половины трубы в межтрубное пространство, что ограничивает интенсификацию теплоотдачи;

по условиям интенсификации теплоотдачи отгибка ребер до миделева сечения трубы бесполезна в тепловом отношении, так как потенциальная теплоотдающая возможность поверхности ребер в этой части трубы полностью реализована, но при этом произойдет рост аэродинамического сопротивления. Такое решение привело бы к положительному эффекту в случае плотного расположения труб в поперечных рядах пучка, что предотвратило бы переток воздуха из межреберных полостей в межтрубное пространство и сопровождалось бы повышением тепловой эффективности.

Задача полезной модели - интенсификация теплоотдачи, уменьшение аэродинамического сопротивления, снижение аэродинамического шума и повышение эксплуатационной надежности трубного пучка в докритическом режиме движения потока за счет разрушения за каждой трубой вихревой дорожки Кармана, уменьшения ее протяженности, увеличения скорости циркуляции и турбулентности потока теплоносителя в аэродинамическом следе, в котором расположена некоторая часть теплоотдающей поверхности труб, вследствие интенсификации обмена энергией с внешним потоком, движущимся вне области следа.

Поставленная задача достигается тем, что трубный пучок прямоугольного фронтального сечения, содержащий трубные решетки и набор шахматно расположенных в них с заданными поперечными S_1 и продольным S_2 шагами круглых труб с поперечными кольцевыми ребрами или спиральными ребрами или круглых гладких труб, омываемых пер-

пендикулярным продольной оси труб потоком теплоносителя, отличающийся тем, что за каждой трубой пучка в их кормовой стороне установлены соосно им и нормально к направлению движения потока плоские экраны высотой H , равной длине трубы между решетками, ширина b которых равна поперечному расстоянию между параллельными осями, проходящими через центры двух продольных смежных рядов шахматно расположенных за трубой вихрей, поочередно отрывающихся с ее боковых сторон и движущихся по направлению потока, при этом экраны установлены по линии, проходящей через центр первого оторвавшегося вихря и параллельной поперечной оси труб каждого ряда, но каждый экран по всей высоте в середине снабжен прорезью прямоугольного поперечного сечения шириной Δ , однако в пучках из круглых гладких труб экраны устанавливаются при шаге $S_2 \geq 2d$, где d - наружный диаметр трубы, а в пучках из круглых труб с поперечными круглыми ребрами продольный шаг $S_2 \geq 2d_0$ при условии $(D/d_0) < 2$, где D - наружный диаметр ребра, d_0 - диаметр по основанию ребер; кроме этого экраны выполнены из мало-теплопроводного материала, толщина δ которых удовлетворяет условию прочности на давление движущегося потока, а материал обеспечивает температурную стойкость и коррозионную устойчивость к теплоносителю, при этом отдельные экраны труб каждого ряда собираются в модули шириной B , равной ширине фронтального сечения пучка, но экраны устанавливают в пучках с докритическим режимом движения потока.

Сформулированные отличительные признаки в совокупности позволяют положительно решить задачу полезной модели.

Существенное отличие заявки заключается в том, что трубный пучок сохраняет теплоотвод (подвод) Q , Вт, в случае уменьшения поверхности теплоотдачи F , m^2 , вследствие интенсификации, т.е. роста коэффициента теплоотдачи α , $Вт/(m^2 \cdot K)$, так как

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где Δt - разность средних температур потока теплоносителя, движущегося через пучок, и теплоотдающей поверхности труб, $^{\circ}C$.

Одновременно с интенсификацией теплоотдачи происходит уменьшение аэродинамического сопротивления пучка ΔP , Па, сопровождающееся меньшей затратой мощности N , Вт, побуждающего устройства на перемещение неизменного объемного расхода теплоносителя V , m^3/c , через межтрубное пространство, так как

$$N = V \cdot \Delta P. \quad (3)$$

Конечным результатом этого процесса является энергосбережение. Как правило, интенсификации теплоотдачи сопутствует опережающий рост сопротивления [4, 5], но не его уменьшение, что характерно для предлагаемого трубного пучка.

Следствием разрушения крупновихревых структур за трубами каждого поперечного ряда пучка является ликвидация источника зарождения аэродинамического шума, создающего некомфортные условия труда и вредное влияние на здоровье персонала, находящегося в зоне его действия. Параллельно предотвращается вихревое возбуждение труб, уменьшается их колебание, а следовательно, повышается эксплуатационная надежность трубного пучка. Вероятность развития резонансного колебания труб сводится к минимуму.

Отличительные признаки достигаются разрушением первых оторвавшихся от боковых сторон труб пучка вихрей, что предотвращает образование за трубами вихревой дорожки Кармана. Для этого за каждой трубой нормально к потоку теплоносителя устанавливается плоский экран, что является новым техническим решением в противоположность известным, направленным на сужение вихревой дорожки.

Отрыв вихрей при поперечном обтекании реальной в гидродинамическом определении жидкостью плохо обтекаемых тел - физическое явление природы, которое нельзя полностью устранить, тогда следует применить такое конструкторское решение, которое не позволяет формировать и развивать в направлении течения дорожку из вихрей, которые по своей категории являются крупными и потребляют извне энергию на поддержание

своей устойчивости. Наиболее простым в техническом осуществлении, но полностью реализующим поставленную задачу, является применение плоских экранов.

Оторвавшиеся поочередно с боковых сторон трубы первые вихри и движущиеся по направлению потока встречаются с препятствием в виде экрана шириной b , равной межцентровому расстоянию между вихрями, параллельно движущимися по сторонам трубы, который разрушает их, и часть потока направляется в область пониженного давления в кормовой половине. Эта часть потока выполняет дефлектирующее действие, улучшает обтекаемость трубы, увеличивает интенсивность движения в следе за трубой, повышает турбулентность потока в нем и через вертикальную прорезь экрана покидает эту кормовую область. Повышается средний коэффициент теплоотдачи вследствие вовлечения в активный теплообмен участков поверхности трубы, находящихся в аэродинамическом следе. А величина этой "балластной" теплоотдающей площади в следе достигает 30-40 % [1].

Вторая часть потока разрушенных вихрей при обтекании боковых кромок экрана отрывается от них с образованием мелковихревой по масштабу структуры, не образующей системного вихревого следа. Мелкие вихри требуют значительно меньшей энергии [7] для поддержания их формирования, но им свойственно повышать турбулентность межтрубной части потока, в которую они диффундируют и дополнительно способствуют интенсификации теплоотдачи.

Улучшение обтекаемости трубы снижает ее сопротивление давления (формы). В итоге от совокупного снижения затрат энергии на разрушение дорожки Кармана и преодоление сопротивления давления снизится аэродинамическое сопротивление пучка. Здесь возникает кажущееся противоречие, но это на первый взгляд. Действительно, установка экранов вносит в поток дополнительное сопротивление, но темп снижения сопротивления пучка от разрушения вихревых дорожек протекает более энергично по сравнению с простом сопротивлении от экранов.

Ширина прорези Δ в экране рассчитывается по аналитическим оценкам на расход потока порядка 30÷35 % от расхода на каждую трубу поперечного ряда. Ширина экрана b в первом приближении может быть назначена несколько большей наружного диаметра d гладкой трубы или диаметра по основанию ребер d_0 ребренной трубы.

Экраны разрушают вихревые дорожки за трубами и лишают поток основного источника аэродинамического шума, изменяют частоту отрыва вихрей, снижают опасность появления вихревого возбуждения их.

Экраны при любых компоновочных характеристиках трубного пучка обеспечивают реализацию положительных свойств, но наибольший энергетический эффект будет достигаться в пучках гладкотрубных при $S_2 \geq 2d$, а из круглоребристых труб при $S_2 \geq 2d_0$ для $D/d_0 < 2$. В таких пучках имеет место устойчивая вихревая дорожка Кармана большой протяженности.

На основании изложенного констатируем, что причина позитивного влияния экрана состоит в разрушении протяженных крупновихревых областей в следе за трубами, изменении числа Струхала, уменьшении интенсивности обратных токов.

Таким образом, в заявленном трубном пучке полностью решены сформулированные задачи.

Полезная модель поясняется фиг. 1÷4. На фиг. 1 изображен трубный пучок, продольный разрез; на фиг. 2 - то же, поперечный разрез; на фиг. 3 дан фрагмент установки экрана в трубном пучке, узел I; на фиг. 4 - отдельный модуль из экранов, продольный разрез, вид спереди.

Трубный пучок состоит из трубных решеток 1; круглоребристых труб 2 длиной H , механически соединенных с трубными решетками; плоских экранов 3 толщиной δ и шириной b , которые расположены между трубными решетками параллельно трубам на расстоянии l от продольной оси трубы до центра оторвавшегося первого вихря с боковой

ВУ 3814 U 2007.08.30

поверхности; уголков 4, приваренных к трубным решеткам таким образом, чтобы был образован каждой парой направляющий паз шириной δ , равной толщине экрана. В трубных решетках 1 размещены круглоребристые трубы 2 в шахматном порядке с поперечным S_1 , продольным S_2 и диагональным S'_2 шагами. Пучок имеет прямоугольное фронтальное сечение шириной B и высотой H . Трубный пучок из круглых гладких труб имеет аналогичную конструкцию.

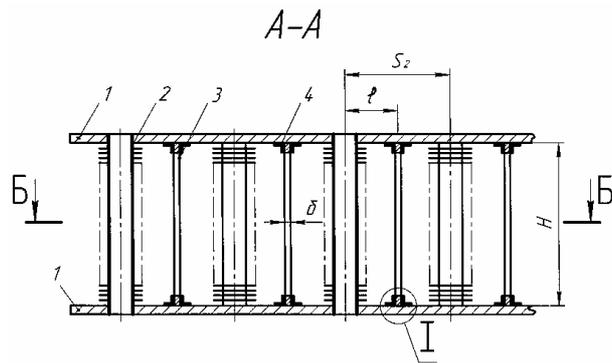
В целях повышения механизации сборки трубного пучка целесообразно собирать модули шириной B из отдельных экранов, которые закрепляются тем или иным способом между накладными планками 5 с шагом S_1 , равным поперечному шагу труб в пучке. После сборки модули задвигаются по направляющим пазам из уголков за каждым поперечным рядом трубного пучка. Материал экрана должен удовлетворять температурной стойкости и коррозионной устойчивости теплоносителя, а его толщина δ определяется из расчета на прочность от давления, создаваемого потоком. Экран должен быть малотеплопроводным для уменьшения отвода тепла на трубные решетки. Для рабочих температур большинства теплообменников "газ-жидкость" можно использовать, например, армированный текстолит.

Трубный пучок работает следующим образом. Теплоноситель (воздух или иной газ) принудительным потоком обтекает снаружи круглоребристые трубы 2. В докритическом режиме течения ламинарный пограничный слой, сформировавшийся на поверхности лобовой половины трубы, отрывается с боковых сторон трубы в окрестности миделевого сечения и сворачивается с некоторой периодичностью в крупные вихри на каждой стороне трубы. Вихри формируются поочередно то с одной боковой стороны, то с другой, отрываются и, двигаясь по направлению движения потока, набегают на экран 3, соударяются с ним и разрушаются. Поток вихря раздваивается, некоторая часть направляется в область аэродинамического следа за кормовой половиной трубы, в котором пониженное давление, выполняя роль аэродинамического дефлектора. Поток следа поджимается к кормовой теплообменной поверхности трубы, увеличивая ее охват и улучшая обтекаемость. Также возрастает скорость движения среды в этой области и турбулентность. Из другой части потока разрушенных вихрей за боковыми кромками экрана возникает мелковихревая пелена, на образование которой требуется значительно меньше внешней энергии, чем на крупные вихри. Пелена диффундирует в основной поток и увеличивает межтрубную турбулентность, дополнительно интенсифицирующую теплообмен. Аналогичные процессы протекают с каждой круглоребристой трубой пучка. В итоге совокупного действия указанных факторов интенсификация средней теплоотдачи пучка достигнет $13 \div 20$ %, а величина аэродинамического сопротивления пучка снизится на $5 \div 16$ %. Тепловая эффективность пучка повысится не менее чем на 25 %, то есть при одинаковых расходах энергии $N = idem$ на прокачку теплоносителя через межтрубное пространство установка экранов увеличивает средний коэффициент теплоотдачи пучка α не менее чем на 25 %. Такому результату эквивалентна тепловая мощность Q пучка, например, в четырехрядном исполнении вместо пятирядного. Соответственно снизится металлоемкость пучка.

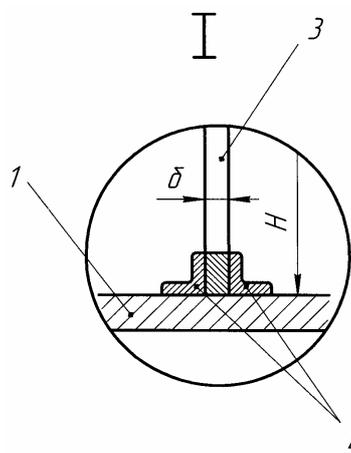
Разрушение крупных вихрей с устойчивой дорожкой Кармана снижает в теплообменнике величину аэродинамического шума, улучшаются санитарные условия для труда.

Экраны вносят дополнительное местное сопротивление движению потока, тем самым усиливая неравномерность распределения давления по поперечному сечению пучка. Вследствие этого нарушается частота и периодичность отрыва вихрей от труб и уменьшается опасность возникновения резонансного возбуждения колебаний трубного пучка. Эксплуатационная надежность пучка возрастает.

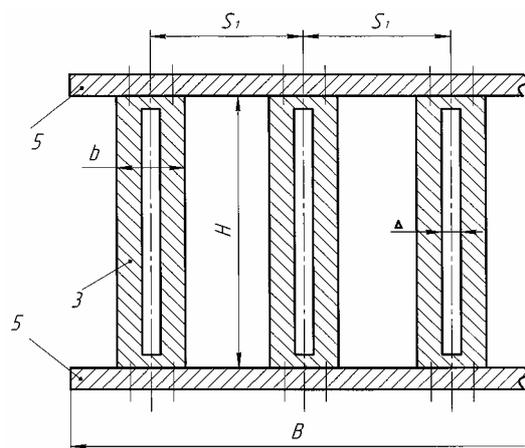
Полезная модель может быть использована заводами-изготовителями поверхностных рекуперативных газожидкостных теплообменников из круглых гладких и ребристых труб.



Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 4