

УДК 621.56

Интенсификация теплоотдачи в пучке труб при их поперечном обтекании потоком с противоточными низкочастотными несимметричными пульсациями

А. И. Хайбуллина*, В. К. Ильин

Приведены результаты математического моделирования теплообмена в пучке труб коридорного расположения в условиях противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций. Рассмотрены актуальность интенсификации теплообмена и проблема моделирования несимметричных пульсаций. Представлена конструкция пульсационной системы для создания противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций в теплообменном оборудовании. Для моделирования теплообмена использовалось ПО Ansys Fluent 14.0, расчет велся в двухмерной постановке без учета сил тяжести. В качестве модели турбулентности была выбрана модель Спаларта–Аллмараса (Spalart–Allmaras, SA) с включенной поправкой на кривизну линии тока SARC. Расчетная область представляла собой прямоугольный канал, состоящий из пучка труб. В результате математического моделирования выявлено положительное влияние пульсирующих течений на коэффициент теплоотдачи. Показано, что с увеличением частоты f и амплитуды пульсаций A интенсивность теплообмена увеличивается независимо от чисел Re . Выполнено сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными при погрешности последних не более 15%. Указаны факторы вызывающие интенсификацию теплообмена в пульсирующих течениях. Из причин, влияющих на прирост интенсивности теплообмена δNu в нестационарном течении по сравнению со стационарным, усредненным по всей области исследования, замечено, что наибольшие влияние на прирост δNu оказывает увеличение скорости жидкости конвективного переноса. Ключевые слова: интенсификация, теплообмен, низкочастотные несимметричные пульсации, пучок труб.

Теплообменные аппараты применяются в энергетике, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, холодильной технике, системах отопления и горячего водоснабжения, различных тепловых двигателях. С ростом энергетических мощностей и объема производства увеличиваются масса и габариты применяемых аппаратов. Поэтому задача по их уменьшению является чрезвычайно актуальной. Наиболее перспективный путь решения заключается в интенсификации теплообмена при помощи принудительных пульсаций

теплоносителя. Положительные результаты в этой области достигнуты как при экспериментальных исследованиях [1], так и при математическом моделировании. [2]

При моделировании теплообмена в различных устройствах с симметричными пульсациями потока жидкости обычно полагают, что скорость пульсирующего потока (профиль скорости), который задают в качестве граничного условия на входе или выходе в исследуемое устройство, меняется по синусоиде [3]. Поскольку в нашем случае пульсации потока имеют несимметричный характер, то мы не можем его использовать в качестве граничного условия. Поэтому

* haybullina.87@mail.ru

было принято решение, сначала выяснить характер профиля скорости в пучке труб в условиях противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций потока жидкости. Для этого была смоделирована гидродинамическая картина потока жидкости, аналогичная опытной установке, на которой затем планировалось проведение экспериментального исследования влияния несимметричных пульсаций на теплообмен в пучке. Моделирование велось при заданных параметрах амплитуды $0,0125 \leq A \leq 0,045$ м, частоты $0,166 \leq f \leq 0,5$ Гц и массового расхода потока жидкости $0,02 \leq G \leq 0,2$ кг/с. Затем полученные профили скоростей (значения скорости от времени) в теплообменном устройстве при заданных A, f и Re были использованы для моделирования теплообмена в пучке труб коридорного расположения.

Для моделирования теплообмена использовалось ПО Ansys Fluent 14.0, расчет велся в двухмерной постановке без учета сил тяжести. Естественная конвекция не учитывалась, так как, во-первых, возникающая естественная конвекция при малых числах Рейнольдса Re может вызывать вертикальную циркуляцию потока жидкости, которая в свою очередь может повлиять на интенсивность теплообмена и внести некоторую сумятицу при определении факторов влияющих на увеличение теплоотдачи в пульсирующих течениях (т.е. усложнить их определение). Во-вторых, учет сил тяжести увеличивает расчетное (машинное) время, требующееся при моделировании на несколько порядков. Здесь также следует добавить, что влияние естественной конвекции на теплообмен в пульсирующих течениях представляет интерес ввиду малоизученности и требует отдельного исследования.

Расчетная область представляет собой прямоугольный канал, состоящий из пучка труб (рис. 1). Диаметр трубок составил $d = 0,01$ м, шаг трубок по горизонтали и вертикали был одинаковым $S_{1,2} = 0,013$ м, т.е. пучок труб располагался в коридорном порядке.

Коридорное расположение труб имеет меньшую эффективность по сравнению с шахматным пучком и, следовательно, повышение эффективности именно коридорной схемы является наиболее актуальной за-

дачей. К тому же при шахматном расположении трубок создается более развитая поверхность течения с меньшими участками застойных зон, в коридорном же пучке поверхность течения менее развитая с куда большими застойными зонами между цилиндрами. А поскольку наш метод интенсификации теплообмена направлен на разрушения застойных зон и на создание более развитой поверхности течения, то следует предположить, что он будет более эффективен именно при коридорном расположении труб.

На входе задавали профили скоростей, соответствующие необходимым A, f и Re с постоянной температурой $T_{вх} = 300$ К, давление на выходе соответствовало давлению окружающей среды.

При моделировании конвективного теплообмена между твердой средой и жидкостью для удобства расчета теплоотдачи задаются условием постоянства температуры стенок, при этом теплоотдачу рассчитывают как отношение теплового потока стенки на температурный напор между стенкой и жидкостью. В нашем случае также задавалось граничное условие постоянной температуры стенок $T_{ст} = 315$ К. Жидкость циркулировала через пучок труб слева направо, температура жидкости увеличивалась к концу пучка. Температура на всех стенках пучка была принята постоянной, в соответствии с условием модели, при изменяющемся тепловом потоке на стенках трубок по пути жидкости.

Расчетная сетка состояла из 67618 контрольных объемов со средним размером 2×10^{-4} м. В качестве модели турбулентности была выбрана модель Спаларта–Аллмараса (Spalart–Allmaras, SA) с включенной поправкой на кривизну линии тока SARC, поскольку она хорошо, зарекомендовала себя как низкорейнольдсовая модель. [4]

На рис. 2 представлены результаты математического моделирования, приведены усредненные значения по поверхности и времени прироста чисел δNu вокруг одного из цилиндров, в зависимости от чисел Re для $f = 0,5A/d = (1,25 \dots 4,5)$. Числа Рейнольдса рассчитывались по следующей формуле:

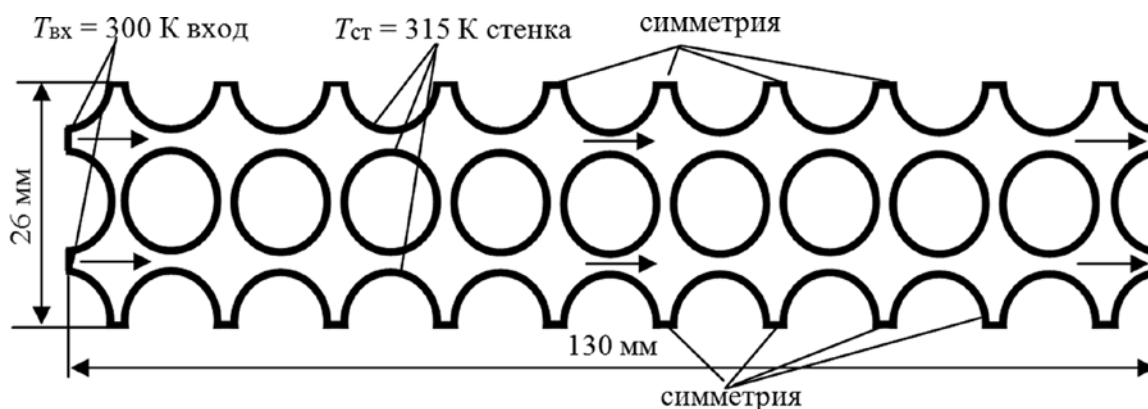


Рис. 1. Расчетная область модели

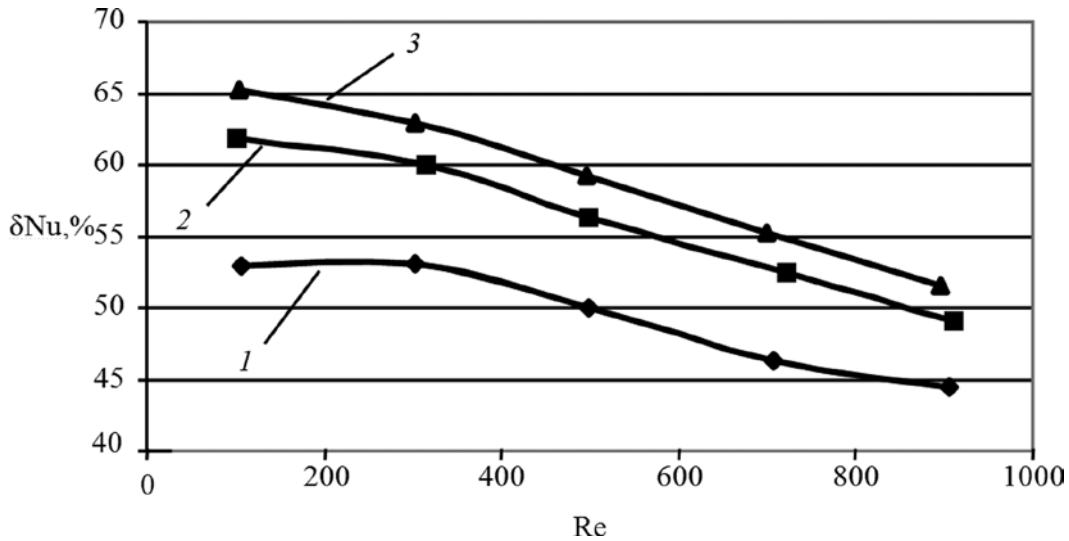


Рис. 2. Зависимость прироста δNu от Re для $f=0,5$ Гц для $A/d = 1,25$ (кривая 1), 3 (кривая 2) и 4,5 (кривая 3):

$\delta Nu = (1 - Nu_{ст} / Nu_{пс}) 100\%$; $Nu_{ст}$, $Nu_{пс}$ — интенсивности теплообмена в стационарном течении и при наложении пульсаций

$$Re = dw/\nu,$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости, m^2/c ; w — скорость жидкости в пучке труб, m/c ; d — диаметр трубок.

Из рис. 2 следует, что с повышением Re происходит понижение прироста чисел δNu . Стоит заметить, что для $A/d = 3, 4, 5$ происходит равномерное убывание прироста δNu , в отличие от $A/d = 1,25$, где сначала наблюдается небольшой прирост до $Re = 300$.

На рис. 3 изображены результаты математического моделирования зависимости прироста δNu от A/d для $f = 0,25$. Отчетливо видно, что с повышением A/d для всех чисел Re происходит повышение δNu . Можно утверждать, что в диапазонах A/d от 1,25 до 3 и Re от 100 до 500 рост исследуемой функции $\delta Nu f(A/d)$ боль-

ше для тех же Re , чем в диапазоне A/d от 3 до 4,5, где рост функции начинает замедляться.

Результаты математического моделирования зависимости прироста δNu от f для $A/d = 4,5$ в диапазоне чисел $Re = 100 \dots 900$ показаны на рис. 4. Из которого очевидно, что повышение частоты f приводит к увеличению теплоотдачи, независимо от чисел Re .

Была разработана серия устройств для создания пульсаций теплоносителей в теплообменных аппаратах [5 — 7]. Они состоят из пульсационной камеры, гидроаккумулятора, генератора пневматических импульсов, устанавливаемых на входе или на выходе из теплообменника (одном из его контуров) для создания колебаний (пульсаций) потока теплоносителя. Используя данные устройства генерации пульсаций можно регулировать амплитуду пульсаций (A , m), при неизменной частоте (f , Гц) и исследовать оба параметра независимо друг от друга, что позволяет найти их наиболее оптимальные значения. Данные устройства позволили смоделировать теплообмен в условиях противоточных несимметричных низкочастотных пульсаций в теплообменном аппарате при наличии пульсационной камеры и гидроаккумулятора. Учитывая положительные результаты математического моделирования, было проведено экспериментальное исследование внешней теплоотдачи при поперечном обтекании коридорного пучка труб с наложением на поток низкочастотных несимметричных пульсаций. Подробное описание методики расчета, порядка проведения

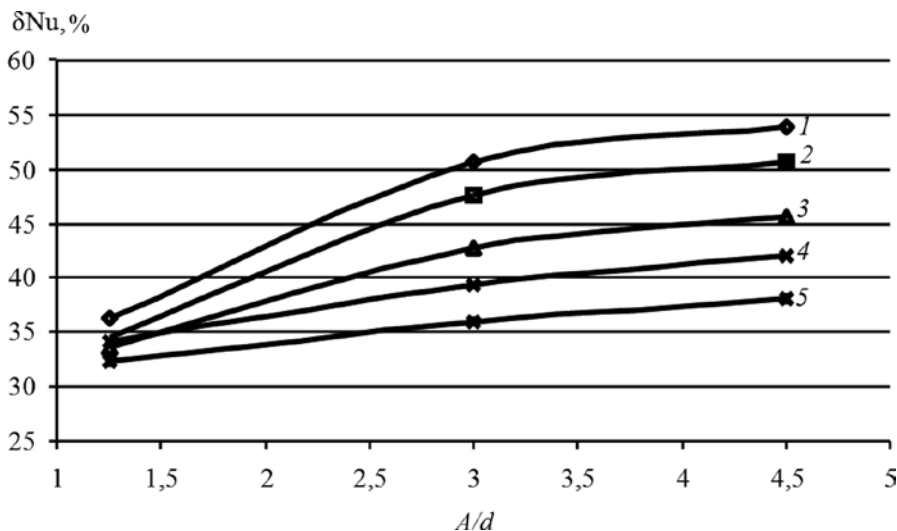


Рис. 3. Зависимость прироста δNu от A/d для $f=0,25$ Гц:

1 — $Re = 100$; 2 — $Re = 300$; 3 — $Re = 500$; 4 — $Re = 700$; 5 — $Re = 900$

данного исследования и его результатов дано в [8]. На рис. 5 — 7 между собой сравниваются данные, полученные экспериментальным и численным методами, при этом погрешность экспериментальных данных составляет не более 15%.

На рис. 5 представлено сравнение результатов численного и экспериментального исследований значения прироста δNu в зависимости от Re для $f = 0,5$ и $A/d = 4,5$. В данном случае, как при математическом моделировании, так и при экспериментальном исследовании с увеличением чисел Re наблюдается понижение δNu . В диапазоне значений Re от 300 до 500 кривые 1 и 2 имеют схожую тенденцию: в обоих случаях наблюдается уменьшение δNu с увеличением Re . В диапазоне Re от 100 до 300 тенденция кривых противоположна. Это может быть связано с тем, что при математическом моделировании не была учтена естественная конвекция, которая увеличивается с уменьшением чисел Re . При этом коэффициент корреляции R эксперименталь-

ных и численных данных составил 0,58, где R определялся следующим образом:

$$R = \left(\frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \right),$$

где x, y — средние значения массива данных по x и y .

С увеличением A/d и частоты f пульсаций в экспериментальном исследовании, также как и при математическом моделировании наблюдается повышение интенсивности теплообмена (рис. 6, 7). При этом коэффициент корреляции экспериментальных и численных данных для зависимости δNu от A/d составил $R = 0,99$ и $R = 0,98$ для δNu от f .

Затем была проведена работа по выявлению факторов, влияющих на увеличение теплоотдачи при наложении на поток жидкости противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций.

Известно, что перенос тепла в потоке жидкости осуществляется за счет конвективных сил, теплопро-

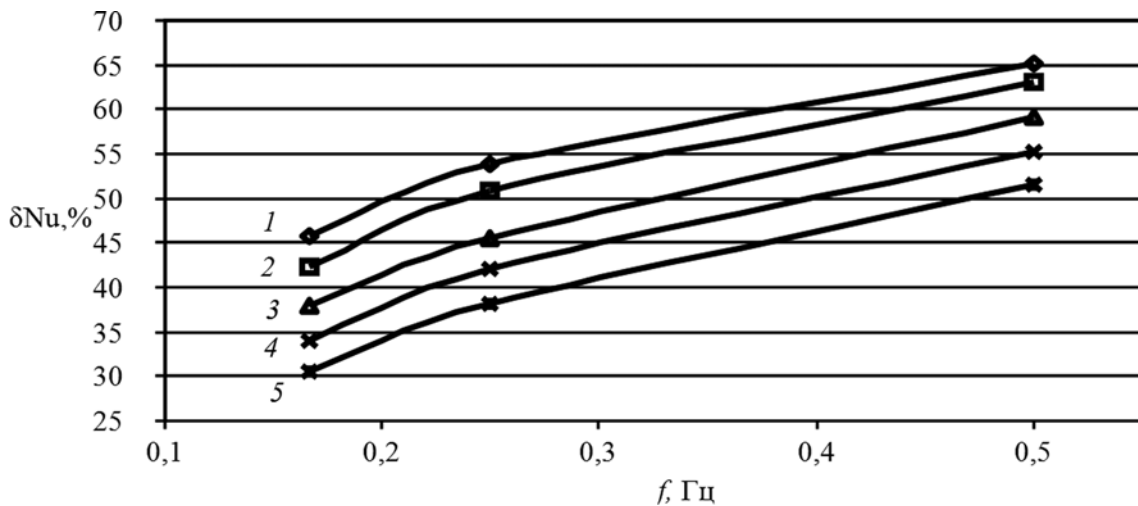


Рис. 4. Зависимость прироста δNu от f при $A/d = 4,5$: 1 — 5 — обозначения те же, что на рис. 3

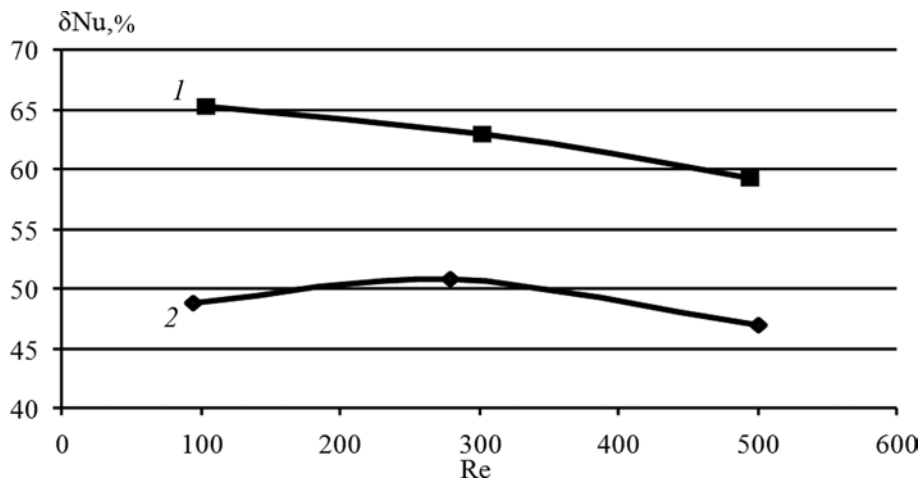


Рис. 5. Интенсивность теплообмена от Re для $f = 0,5$ и $A/d = 4,5$:

1 — численное решение; 2 — эксперимент

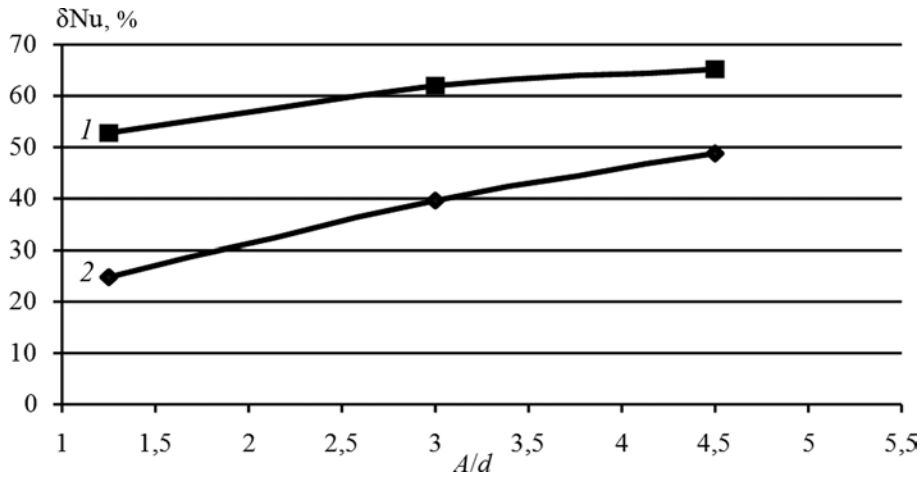


Рис. 6. Интенсивность теплообмена от A/d для $f=0,5$ и $Re = 100$:
1, 2 — обозначения те же, что на рис. 5

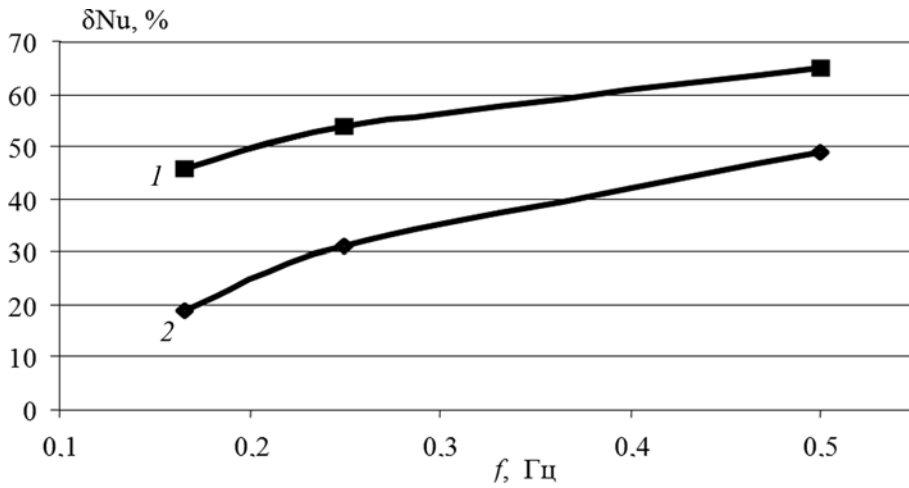


Рис. 7. Интенсивность теплообмена от f для $A/d = 4,5$ и $Re = 100$:
1, 2 — обозначения те же, что на рис. 5

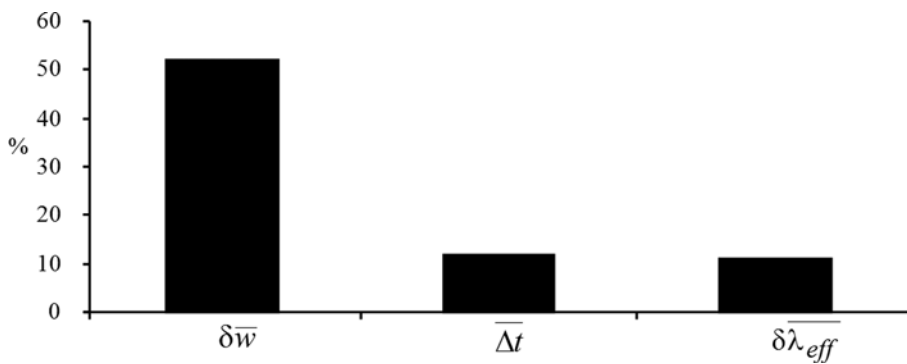


Рис. 8. Изменение $\delta \bar{w}$, $\overline{\delta \lambda_{eff}}$, $\overline{\delta \Delta t}$ в пульсирующем течении по сравнению со стационарным усредненная по всей области исследования

водности и турбулентности потока и зависит от температурного напора.

С помощью математической модели можно косвенно проанализировать, как меняется выше указанные силы в пульсирующем течении по сравнению со стационарным.

Изменения конвективных сил оценивались с помощью значений скоростей жидкости, усредненных по времени и области вокруг одного из цилиндров \bar{w} , м/с; изменения теплопроводности и турбулентности — с помощью усредненной аналогично \bar{w} эффективной теплопроводности:

$$\overline{\lambda_{eff}} = \bar{\lambda} + \overline{\lambda_t}, \text{ Вт/м}^2,$$

где $\bar{\lambda}$ и $\overline{\lambda_t}$ — обычная и турбулентная теплопроводности. Изменение температурного напора $\overline{\Delta t}$, К оценивалось как разница температур между стенкой и жидкостью в области вокруг цилиндра усредненная аналогично \bar{w} и $\overline{\lambda_{eff}}$.

На рис. 8 изображен прирост $\overline{\delta w}$, $\overline{\delta \lambda_{eff}}$, $\overline{\delta \Delta t}$ в процентном соотношении в пульсирующем течении по сравнению со стационарным течением усредненных для одного из цилиндров по всей области исследования $0,0125 \leq A \leq 0,045$ м, $0,166 \leq f \leq 0,5$ Гц и чисел $100 \leq Re \leq 900$. Видно, что при наложении пульсаций происходит увеличение $\overline{\delta w}$, $\overline{\delta \lambda_{eff}}$, $\overline{\delta \Delta t}$, причем больше всего оно затрагивает скорость потока $\overline{\delta w}$, значения же $\overline{\delta \Delta t}$ и $\overline{\delta \lambda_{eff}}$ практически совпадают.

Таким образом, можно косвенно судить о том, что увеличение теплоотдачи во всей области исследования в пульсирующем течении связано с увеличением всех трех факторов, но в большей степени с увеличением конвективной составляющей скорости потока.

Таким образом, оценивая результаты экспериментального исследования можно убедительно говорить, что во всем исследованном диапазоне A , f и чисел Re зафиксировано повышение коэффициента теплоотдачи

Амплитуда и частота имеют схожее влияние: в обоих случаях увеличение приводит к росту δNu независимо от чисел Re как при математическом моделировании, так и при экспериментальном исследовании.

В целом можно сделать вывод, что результаты численного решения и экспериментального исследования неплохо коррелируются между собой для зависимостей δNu от A/d и f при коэффициентах корреляции $R = 0,99$ и $0,98$, соответственно.

Плохая корреляция для δNu от Re возможно связана с тем, что при моделировании не были учтены силы естественной конвекции, что требует отдельного детального исследования.

Из трех факторов влияющих на прирост чисел δNu в нестационарном течении, по сравнению со стационарным, усредненным по всей области исследования, наибольшее влияние оказывает увеличение скорости жидкости конвективного переноса.

Литература

1. **Тae Ho Ji, Seo Young Kim, Jae Min Hyun.** Experiments on heat transfer enhancement from a heated square cylinder in a pulsating channel flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. N 51. P. 1130 — 1138.
2. **Мусаева Д.А., Синявин А.А., Гурьянов А.И.** Математическое моделирование процессов теплообмена при поперечном обтекании цилиндра в условиях низкочастотных несимметричных пульсаций потока жидкости // Известия ВУЗов. Сер. Проблемы энергетики. 2012. № 7 — 8. С. 19 — 27.
3. **Hassanzadeh Afrouzi H. e. a.** Pulsating flow and heat transfer in a helical tube with constant heat flux // Intern. J. Advance Industrial Eng. 2013. V. 1. N 2. P. 36 — 39.
4. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
5. **Пат. № 146381 РФ.** Устройство для создания пульсаций теплоносителей в теплообменных аппаратах / А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, А.А. Синявин, В.К. Ильин // Бюл. изобрет. 2014. № 28.
6. **Пат. 146722 РФ.** Устройство для создания пульсаций теплоносителей в теплообменных аппаратах / А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, А.А. Синявин, В.К. Ильин // Бюл. изобрет. 2014. № 29.
7. **Пат. 147387 РФ.** Устройство для создания пульсаций теплоносителей в теплообменных аппаратах / А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, А.А. Синявин, В.К. Ильин // Бюл. изобрет. 2014. № 31.
8. **Хайбуллина А.И., Ильин В.К.** Экспериментальное исследование внешней теплоотдачи при поперечном обтекании коридорного пучка труб при $Re \leq 500$ с наложением на поток низкочастотных несимметричных пульсаций. // Известия ВУЗов. Сер. Проблемы энергетики. 2014. № 1 — 2, С. 11 — 19.

Статья поступила в редакцию 17.12.2015