

систем отопления лежит параметр, который является характеристикой объекта. Если этот параметр принимается постоянным по проектным данным ($\alpha_{пр}$), то это регулирование по графику ЦКР. Если параметр определяется путем статистики самой системой автоматики, то это способ регулирования по графику ЦКР с автоподстройкой (α). Если в качестве параметра принимается его текущее значение, то это регулирование по математической модели объекта (α_i). Все три способа автоматического регулирования нашли применение на практике.

Выводы

Однако следует иметь в виду, что наиболее экономичным способом автоматического регулирования является способ регулирования по математической модели объекта. В результате имитационного моделирования с использованием виртуальной модели реального объекта удалось установить, что по сравнению с другими способ автоматизации системы отопления по графику ЦКР с автоподстройкой приводит к повышению расхода энергии на 5 %, а способ по графику ЦКР — к повышению расхода энергии на 16 %.

Все расчеты проведены для идеальных условий, не учитывается износ теплообменных поверхностей, влияние дополнительных источников или стоков тепла и т.д.

Список литературы

1. Назарбаев Н.А. Материалы сайта РИА-Новости — news.mail.ru.
2. Волов Г.Я. Моделирование работы систем отопления, вентиляции и теплоснабжения. — Минск: ОДО «Энергогент», 2007. — 154 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 483 с.

УДК 621.7

Б.Р.Нусупбеков

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Мақалада соңғы кезде кең ауқым алып келе жатқан электрогидравликалық эффектіні қолдану жолдары қарастырылған. Сұйықтардың әр түрлі жылдамдықтары кезіндегі температура-лардың таралуы мен жылу беру коэффициенттерінің артуы қарастырылған. Сонымен қатар жылуалмастырғыштардағы пайда болатын қақтарды тазалау жолдары көрсетілген.

In the given work has been devoted to research of influence of electrohydraulic effect on heat exchange of a lamellar surface. Experimental electrohydraulic installation is developed and collected. As shows an expert, a physical basis of heat exchange by electrohydraulic influence is the turbulence of a boundary layer on a surface of heat exchange. At equal speeds and constant temperature of a stream average factors of heat exchange were defined at known density of a thermal stream. At all values of frequency of the recharge the general law of influence of number of Reynolds on local factor of heat exchange is observed. The minimal value of energy at which destruction of adjournment of the investigated brass pipe begins, is equal nearby 45 Joule. From the received results the length defining area of destruction follows, that, can make, at least, some calibres of diameter of a pipe.

Конвективный теплообмен происходит при обтекании поверхностей жидкостью или газом. При этом перенос тепла осуществляется одновременно молекулярной кондукцией и макроскопическими объемами, перемещающимися в среде, двигаясь из области с одной температурой в область с другой температурой. Вследствие изменения плотности нагретой жидкости под действием архимедовых сил возникает движение жидкости, называемое естественной конвекцией [1].

Если движение жидкости возникает в результате перепада давления, поддерживаемого внешними условиями, то такой процесс теплообмена называется вынужденной тепловой конвекцией. По-

скольку в промышленных теплообменниках поток теплоносителя всегда движется под действием насоса или вентилятора, то в дальнейшем будем рассматривать только процессы вынужденного конвективного теплообмена [2].

Интенсивность процесса теплообмена в технологическом аппарате определяется формой теплообменников, скоростью движения теплоносителей, физическими свойствами рабочей среды и т.д. Коэффициент теплоотдачи определяется отношением количества отдаваемой теплоты в единицу времени к температурному напору и площади поверхности теплообмена. Коэффициент теплоотдачи также является сложной величиной, зависящей от физических свойств рабочей среды, скорости ее движения, геометрических размеров канала и формы теплопередающей стенки. Соответственно интенсификация процессов теплопередачи затрагивает такие вопросы, как уменьшение необходимой площади поверхности теплообмена, габаритные размеры аппаратов, их металлоемкость и стоимость. Главным показателем интенсификации процесса теплообмена в технологическом аппарате является ее комплексная эффективность, обеспечивающая экономическую выгодность [3].

Создание различных способов интенсификации конвективного теплообмена, все новых форм рабочих поверхностей и конструкций теплообменных аппаратов тесно связаны с проблемой повышения их экономической эффективности. К настоящему времени предложены и исследованы разнообразные способы интенсификации конвективного теплообмена [1–5]. Основными из них являются:

- 1) турбулизация движения рабочей среды путем изменения формы теплообменных поверхностей [3];
- 2) механическая интенсификация теплообмена вращением поверхностей (внутренних и внешних), вибрацией элементов теплообменника, перемешиванием жидкости [3, 4];
- 3) вдув или отсос рабочей среды через пористую поверхность [4, 5];
- 4) добавка в жидкость твердых частиц или газовых пузырьков [6];
- 5) воздействие на характеристики потока турбулизирующими вставками [7].

В ряде случаев могут быть эффективными более сложные методы интенсификации теплообмена, например, применение спиральных, витых труб [4–7], закручивающих поток. Практикуется также использование многозаходных шнеков перед тем участком канала, в котором имеет место повышенное тепловыделение. В криволинейных каналах под воздействием центробежных сил развиваются винтообразные структуры, охватывающие все сечение канала. Кроме того, при достаточно крутых поворотах могут возникать отрывные зоны с системой двухмерных и трехмерных вихрей в них. На вогнутой стенке может появиться система винтообразных вихрей с противоположным направлением вращения. Все это способствует развитию турбулентного потока и росту, следовательно, теплоотдачи и гидравлического сопротивления [2–7].

Для исследования влияния электрогидравлического эффекта [8–12] на теплообмен пластины была разработана и собрана экспериментальная установка. Гидросистема представляет собой замкнутую систему, в которой жидкость циркулирует непрерывно в течение времени эксперимента. Система заполняется технической водой из водопроводного крана. Жидкость из бака центробежным насосом подавалась через расходомер, состоящий из сменных шайб жидкостного манометра, в успокоительную камеру. Поток жидкости, содержащий крупномасштабные турбулентные вихри, проходя через выравнивающие сетки (хонейкомб), стабилизируется и через переходник снова подается в первоначальный бак. Этот цикл непрерывно повторяется во время эксперимента. На пластине по длине канала расположено 7 «горячих» спаев термопар. В дальнейшем при проведении экспериментов количество «горячих» спаев термопар было увеличено до 16 штук, с целью повышения точности измерений. Холодные спаи находятся в $20 \cdot 10^{-3}$ м от передней кромки фольги в набегающем потоке и термоЭДС, возникающая в термопарах, позволяет определить разность температуры набегающего потока и фольги. Термопары изготовлены из медной и константановой проволоки диаметрами $0,7 \cdot 10^{-4}$ м, которые приведены к внутренней стороне фольги с интервалами, указанными на рисунке 1. Элементы установки жестко закреплены к массивной стойке с целью предотвращения неконтролируемых вибраций. В качестве нагреваемой поверхности использовалась латунная фольга толщиной $0,1 \cdot 10^{-3}$ м, шириной $6 \cdot 10^{-2}$ м, длиной 0,5 м. Обогрев фольги осуществлялся переменным электрическим током [13–16].

Поперечное сечение фольги намного меньше поперечного сечения кабеля и на ней выделяется практически вся теплота, в которую превращается подводимая электрическая энергия.

Распределение температуры вдоль обогреваемой фольги было изучено в области чисел Re от $8,35 \cdot 10^3$ до $4,12 \cdot 10^4$ без разряда и с электрогидравлическим воздействием при различных частотах следования импульсов от 1 до 20 Гц.

При равных скоростях и постоянной температуре набегающего потока определялись средние коэффициенты теплоотдачи при плотностях теплового потока от 2885 до 4040 Вт/м². Так как тепловой поток и площадь поверхности теплоотдачи сохраняют постоянное значение в этих измерениях, рассматривалась обратная зависимость коэффициента теплоотдачи от разности температур.

Некоторые результаты измерений разности температур вдоль фольги представлены на рисунках 1 и 2. При всех значениях частоты разряда наблюдается общая закономерность влияния числа Рейнольдса на локальный коэффициент теплоотдачи.

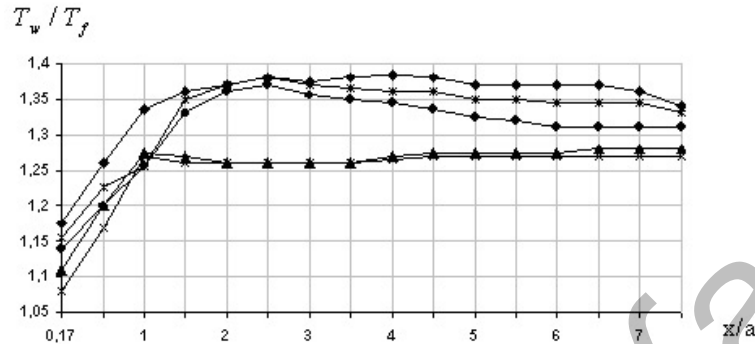


Рис. 1. Изменение относительной температуры поверхности по потоку при различных частотах разряда: $q = 3393$ Вт/м²; $f =$: \diamond — 0; * — 1; \blacktriangle — 3 Гц; \circ — 5 Гц; \times — 10 Гц; $Re =$: a — 8350

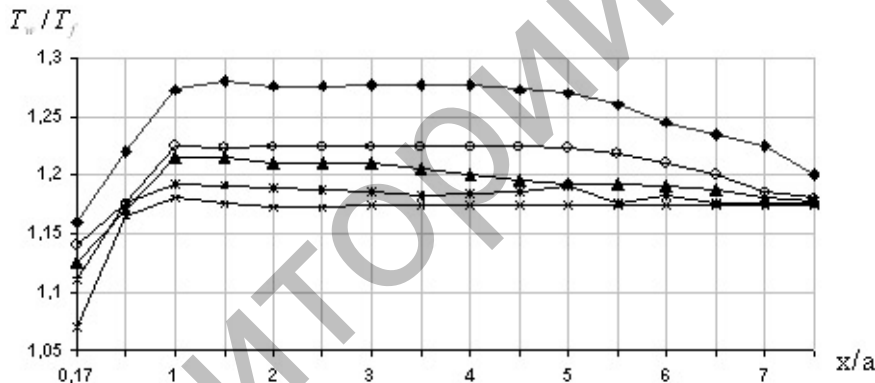


Рис. 2. Изменение относительной температуры поверхности по потоку при различных частотах разряда: $q = 3393$ Вт/м²; $f =$: \diamond — 0; * — 1; \blacktriangle — 3 Гц; \circ — 5 Гц; \times — 10 Гц; $Re = 13720$

Из-за малой толщины фольги мы будем говорить о локальном коэффициенте теплоотдачи, который обратно пропорционален местному значению разности температур (рис. 3 и 4). С ростом числа Рейнольдса устанавливается равномерная теплоотдача вдоль поверхности, уменьшается влияние частоты электрического разряда. Это объясняется турбулизацией пристенного пограничного слоя с ростом Re , вследствие чего ослабевает влияние внешних факторов на теплообмен поверхности. По современным представлениям [17, 18] турбулентность не является хаосом в обычном смысле слова, а представляет собой некоторый процесс самоорганизации.

При развитой турбулентности в жидкости образуются различные вихревые структуры, которые являются относительно устойчивыми, чем при ламинарном движении.

Задачей дальнейших исследований явилось определение различных факторов, влияющих на степень турбулизации потока жидкости в теплообменнике. Предварительные исследования показали, что главным параметром, приводящим к интенсификации теплообмена, является частота разряда (f) на коммутирующем устройстве. Чтобы оценить результирующее влияние этого фактора, анализировалась зависимость среднего значения числа Нуссельта от частоты разряда на коммутирующем устройстве. На рисунке 5 представлены зависимости $Nu = Nu(f)$ для различных значений частоты разрядов. При частоте разрядов $f \sim 5$ Гц, рост теплоотдачи поверхности достигает 30 % по сравнению со случаем отсутствия электрогидравлического воздействия ($f = 0$). Этот эффект можно объяс-

нить совпадением частоты гидродинамических возмущений (крупномасштабных вихрей) с характерной частотой процесса теплообмена на поверхности. Сказанное можно подтвердить следующими оценками. Примем скорость потока порядка (по эксперименту) 0,2 м/с, характерным размером рассматриваемого процесса ширину пластины $a = 0,06$ м. Тогда из этих данных получаем характерную частоту процесса $f \sim 5$ Гц. Если принять во внимание увеличение скорости потока жидкости влиянием электрического взрыва, то характерная частота конвективного теплообмена в условиях эксперимента может составить величину порядка $f \sim 5 \div 6$ Гц.

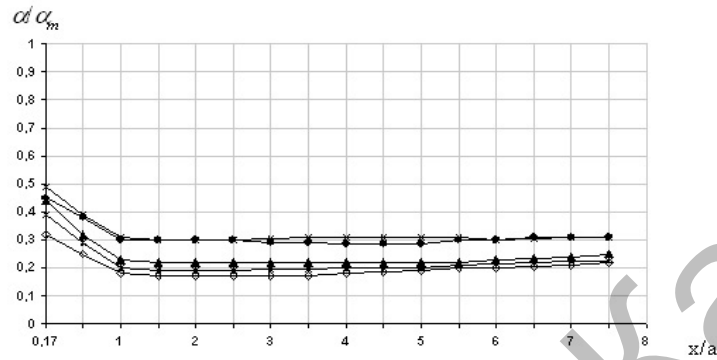


Рис. 3. Зависимость локального коэффициента теплоотдачи при различных частотах разряда: $q = 2885 \text{ Вт/м}^2$; f : \diamond — 0 Гц; * — 1 Гц; \blacktriangle — 3 Гц; \circ — 5 Гц; \times — 10 Гц; $Re=13720$

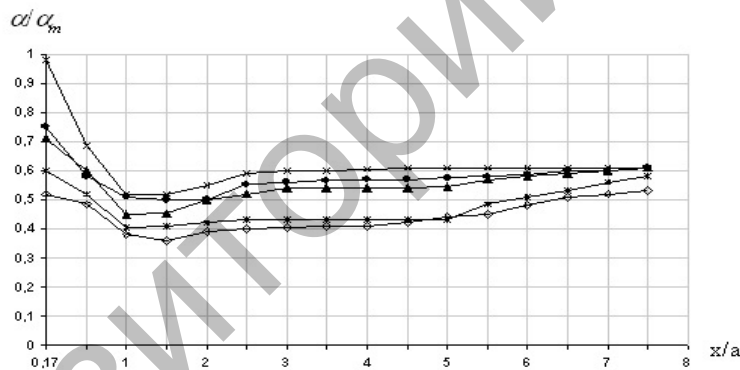


Рис. 4. Зависимость локального коэффициента теплоотдачи при различных частотах разряда: $q = 2885 \text{ Вт/м}^2$; f : \diamond — 0 Гц; * — 1 Гц; \blacktriangle — 3 Гц; \circ — 5 Гц; \times — 10 Гц; $Re=31000$

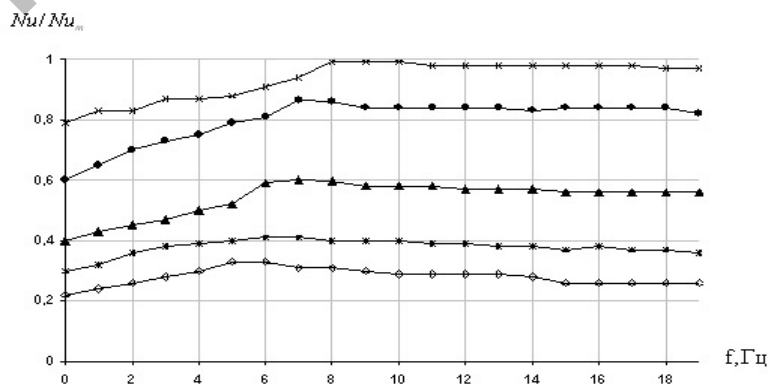


Рис. 5. Зависимость усредненного числа Нуссельта от числа Рейнольдса при различных частотах следования импульсов: $q = 3393 \text{ Вт/м}^2$; Re : \diamond — 8350; * — 13720; \blacktriangle — 21000; \circ — 31000; \times — 41200

Таким образом, физической основой интенсификации теплообмена электрогидравлическим воздействием является турбулизация пограничного слоя на поверхности теплообменника. Пульсирующий разряд возбуждает турбулентность с энергосодержащими (крупномасштабными вихрями), частота которых определяется характерными параметрами потока и теплообменной поверхности.

Факт возбуждения турбулентности с характерными частотами крупномасштабных вихрей, определяемыми параметрами рабочего потока, и зависимость усредненного числа Nu от частоты следования разрядов геометрией обтекаемого тела доказаны физическими экспериментами в неоднородных течениях типа струя – пограничный слой – след [2].

Описанный механизм влияния электрогидравлического эффекта на интенсивность теплообмена подтверждается также анализом зависимости $Nu = Nu(Re)$. Данные можно аппроксимировать формулами

$$Nu = C \cdot Re^n,$$

где C — постоянная; n — показатель степени, зависящий от частоты f . При $f = 0$ имеем $n \sim 0,6$, при $f \sim 5 \div 6$ Гц значение $n \sim 0,8$. Зависимость вида $Nu = C \cdot Re^n$ общеизвестна в теплофизике [1]. В ламинарном течении $n = 0,5$, в турбулентном режиме конвективного теплообмена из экспериментов следует $n = 0,8$. В работах [17–19] показано, что значения показателя n можно оценить теоретически, если принять во внимание структурную (фрактальную), т.е. вихревую природу турбулентности. Из теории следует $n_1 = 0,465$ в случае регулярного движения жидкости, $n_0 = 0,7925$ при развитом турбулентном движении.

Рост коэффициента теплоотдачи под влиянием электрогидравлического воздействия достигает 30 %. Полученные нами результаты подтверждаются с данными известных физических исследований влияния турбулентности на теплообмен.

В работе [20] показано, что турбулентность, развиваемая естественным образом в струйных течениях, может увеличить теплообмен до 30–40 % по сравнению с обтеканием тела невозмущенным однородным потоком. Необходимо учесть, что часть эффекта интенсификации теплообмена в струйных течениях связана с безотрывностью обтекания тел.

Основные лабораторные опыты по разрушению отложений проводились на трубах диаметром от 12 до 51 мм, взятых отработанных бойлеров, водопароперегревателей и котлов Карагандинского машзавода № 1 с так называемыми тяжелыми отложениями типа накипи. Как правило, трубы с такими отложениями традиционными методами не очищались, а заменялись новыми.

На основе визуальных наблюдений и измерений распределения давления по стенке труб определены минимальные значения энергии, при которых происходит интенсивное разрушение отложений. На рисунке 6 представлено изменение давления, вызванного взрывом, по длине трубы диаметром 18,8 мм. На расстоянии около десяти калибров давление падает примерно в два раза. Для измерения импульсных давлений применялись известные методики, используемые проектно-конструкторским бюро электрогидравлики АН Украины [11].

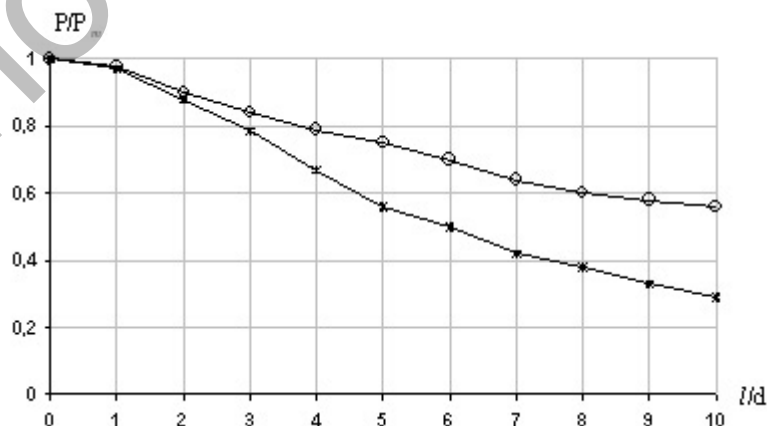


Рис. 6. Изменение давления по длине трубы: $W = 90$ Дж; $d = 18,8$ мм; $\delta_{отл}$: \circ — 0 мм; $*$ — 3 мм

Зависимость длины зоны разрушения от энергии взрыва представлена на рисунке 7. Минимальное значение энергии, при котором начинается разрушение отложений исследованной латунной тру-

бы, составляет около 45 Дж. Из полученных результатов следует, что длина, определяющая область разрушения, может составить, как минимум, несколько калибров диаметра трубы. Аналогичные данные получены для стальных, титановых труб такого же диаметра (около 20 мм), которые наиболее часто применяются в теплоэнергетике.

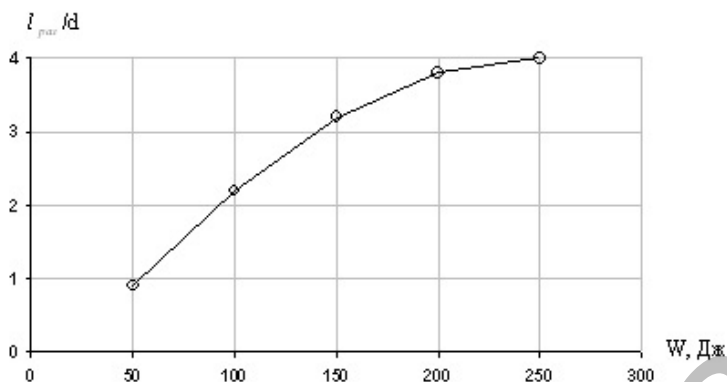


Рис. 7. Зависимость длины зоны разрушения от энергии разряда: $d = 18,8$ мм; $\delta_{отл} = 3$ мм

Важным моментом является то, что длина зоны разрушения не всегда прямо пропорциональна энергии взрыва. С ростом подводимой энергии ($W \gg 200$ Дж) наблюдается тенденция к замедлению роста l_p . Этот факт указывает на существование некоторых оптимальных значений энергии электрического разряда.

Ограничение верхнего предела значений энергии разряда связано также с возможностью разрушения стенок трубы и появления пластических деформаций, трещин на теплообменных поверхностях. Были проведены специальные исследования по определению максимально допустимой энергии единичных разрядов в зависимости от материала и толщины обрабатываемой поверхности. Для одной из исследованных латунных труб экспериментальная зависимость представлена на рисунке 8. Аналогичные данные нами получены для стальных, титановых труб и труб из нержавеющей стали, которые наиболее часто применяются в промышленной теплоэнергетике. В исследованном диапазоне энергии в этих трубах микротрещины не наблюдались.

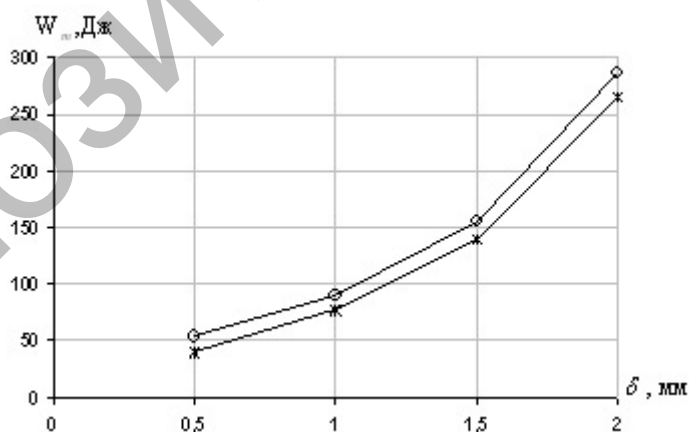


Рис. 8. Зависимость максимально допустимой энергии разряда от толщины стенок обрабатываемой трубы $d =$: \circ — 25 мм; $*$ — 18,8 мм

В следующих сериях опытов, меняя диаметр трубы и толщины отложений, по известному значению минимального давления определялось значение энергии разряда, необходимого для эффективного разрушения отложений. В дальнейшем опыты по очистке проводились в оптимальном режиме, когда значение энергии обеспечивало эффективное разрушение отложений, не оказывая при этом разрушающего действия на стенки трубы. Результаты этих исследований использовались при создании промышленного варианта аппаратуры.

Таким образом, на основе проведенных экспериментальных исследований и их анализа можно сделать вывод, что электрогидравлическое воздействие не только интенсифицирует процессы переноса, но и может выполнять роль очистки от отложений различного рода. Причем достигнутое увеличение теплоотдачи намного проще, чем традиционные методы интенсификации. Проведение этих исследований и внедрение их результатов на предприятия будут способствовать техническому прогрессу в промышленности.

Список литературы

1. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. — М.: Наука, 1982. — 472 с.
2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
3. Дыбан Е.П., Этик Э.Я. Влияние турбулентности потока на развитие теплового пограничного слоя, на интенсивность теплообмена в начальном участке трубы // Теплообмен. — М.: Энергия, 1968. — С. 514–520.
4. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 240 с.
5. Интенсификация теплообмена // Успехи теплопередачи / Под ред. А.А.Жукаускаса — Вильнюс: Мокслас. — 1988. — 188 с.
6. Вишневецкий В.В., Сюткин С.В. и др. Способ интенсификации теплообмена. // А.С. 1083067 А(СССР) — Оpubл. в Б.И. 1984. — № 12.
7. Калафати Д.Д., Попалов В.В. Оптимизация теплообменников по эффективности теплообмена. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 152 с.
8. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. — Киев: Наук. думка, 1979. — 208 с.
9. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. — Киев: Наук. думка, 1983. — 272 с.
10. Подводный электровзрыв // Сб. науч. тр. / Ред. Г.А.Гулый и др. — Киев: Наук. думка, 1985. — 116 с.
11. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий // АН УССР ПКБ Электрогидравлики. — Киев: Наук. думка, 1990. — 280 с.
12. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. — Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-е, 1986. — 253 с.
13. Кусаиынов К.К., Нусупбеков Б.Р., Турмухамбетов А.Ж. Об одном способе интенсификации теплообменного процесса. Региональные проблемы энергосбережения в децентрализованной теплоэнергетике // Материалы междунар. науч.-практ. конф. — Киев, 2000. — С. 35–38.
14. Кусаиынов К.К., Нусупбеков Б.Р., Турмухамбетов А.Ж. Установка для электрогидравлической очистки труб от твердых отложений // Промышленная теплотехника. — 2001. — № 1–2. — Т. 23. — С. 76–78.
15. Электрогидравликалық эффектiнiң әсерiмен жылу алмастырғыш қондырғылардың пәрмендiлiгiн арттыру // ҚарМУ хабаршысы. Физика сер. — 2006. — № 1(41). — 38–44-б.
16. Научно-методические основы электрогидроимпульсных методов очистки теплоагрегатов для решения экологических задач // Актуальные проблемы экологии и природопользования в Казахстане и сопредельных территориях: Материалы II междунар. науч.-практ. конф. — Павлодар: ПГУ, 2007. — С. 142–145.
17. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. — М.: Наука, 1990. — 320 с.
18. Жанабаев З.Ж. Лекции по нелинейной физике: Учеб. пособие. — Алматы: Қазақ ун-ті, 1997. — 72 с.
19. Штерн В.Н. Элементарная структурная модель турбулентного перемешивания // Структурная турбулентность / Под ред. М.А.Гольдштика. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1982. — 116 с.
20. Жанабаев З.Ж. Аэродинамика и теплообмен цилиндра и шара при струйном обтекании: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Алма-Ата: КазГУ, 1968. — 22 с.