

УДК 66.048

**Д. В. САВИЧ, Н. В. ДОЛГОВ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА АППАРАТОВ ПЛЕНОЧНОГО ТИПА**

**Аннотация.** В статье проведен анализ существующих методов интенсификации теплообмена, конкретизированы основные условия для выбора оптимального метода интенсификации, выполнен анализ путей совершенствования поверхностей теплообмена. Выделены и изучены значимые интенсифицирующие факторы в аппаратах пленочного типа, а именно – влияние волнообразования; зона входного участка, которая зависит от каплеобразующего устройства; микроструктура поверхности трубы, определен наиболее эффективный вид накатки на наружной поверхности труб. Даны рекомендации по выбору метода интенсификации теплообмена. Краткое изложение современных представлений о поверхностях теплообмена показывает, что поиски путей оптимизации процессов и повышения эффективности теплообмена требуют комплексного системного рассмотрения как макро- и микроструктуры поверхности, так и условий взаимодействия поверхности с теплоносителем в конкретных задачах. Необходимо отметить, что при выборе для практического применения того или иного метода интенсификации теплообмена приходится учитывать не только эффективность самой поверхности, но и технологичность ее изготовления, технологичность сборки теплообменного аппарата, прочностные требования, загрязняемость поверхности, особенности эксплуатации и т. д.

**Ключевые слова:** интенсификация, поверхность теплообмена, микро- и макроструктура, пленочные аппараты, волнообразование, искусственная шероховатость, входной участок.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Интенсификация теплообмена и повышение энергетической эффективности теплообменных аппаратов представляют большой интерес и имеют огромное народнохозяйственное значение. К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал по этой теме, как у нас в стране, так и за рубежом. Уменьшение массы и габаритов теплообменных аппаратов является актуальной проблемой. Наиболее перспективный путь решения этой проблемы – интенсификация теплообмена. Опыт создания и эксплуатации различных тепломассообменных устройств показал, что разработанные к настоящему времени методы интенсификации теплообмена обеспечивают снижение габаритов и металлоемкости (массы) этих устройств в два и более по сравнению с аналогичными серийно выпускаемыми устройствами при одинаковой тепловой мощности и мощности на прокачку теплоносителей. Исследования интенсификации теплообмена осуществляются в различных странах, причем в заметно возрастающем темпе.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Необходимо отметить, что проведенные ранее исследования внесли значительный вклад в решение этой проблемы, особенно в создание практически реализуемых методов интенсификации теплообмена. И только практической незаинтересованностью промышленности во внедрении высокоэффективных теплообменных аппаратов и в экономии металла можно объяснить слабое внедрение отечественных разработок в народное хозяйство.

Одним из перспективных путей создания эффективных компактных теплообменников является применение высокоэффективных поверхностей теплообмена, использование современных методов интенсификации теплообмена в аппаратах.

## ЦЕЛЬ

Анализ методов и способ интенсификации процессов теплообмена; выбор возможных вариантов интенсификации для контактного пленочного теплообменного аппарата.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

При разработке теплообменного оборудования используется довольно широкий перечень способов интенсификации, некоторые из них являются для теплоэнергетики достаточно традиционными [1].

Различные способы интенсификации теплообмена в пленочных аппаратах разработаны и исследованы в неодинаковой степени, лишь часть из них доведена до уровня промышленного использования.

Способы интенсификации процессов тепло- и массообмена в тонких слоях жидкостей можно условно разделить на две группы: пассивная (конструктивная) турбулизация, не требующая дополнительных затрат энергии во время работы аппарата (искусственная шероховатость стенки, ее конфигурация и т. д.); активная (режимная) турбулизация, требующая дополнительных затрат энергии при проведении процессов (создание поля центробежных сил, механический срыв пленки, вибрация стенки, пульсация напора жидкости при распределении ее в пленку и т. д.).

В промышленных пленочных аппаратах используются как активная, так и пассивная турбулизация тонкого жидкостного слоя. Активная (режимная) турбулизация обычно более эффективна и перспективна и с точки зрения интенсификации процессов тепло- и массообмена ей следует отдать предпочтение. Однако в каждом конкретном случае необходимо учитывать также расход дополнительной энергии.

Некоторые способы интенсификации процессов тепло- и массообмена в жидкостных пленках будут рассмотрены ниже (Воронцов).

При создании любых теплообменных аппаратов (ТА) и устройств (ТУ) с помощью оптимального для конкретных целей метода интенсификации теплообмена можно добиться существенного улучшения характеристик ТА и ТУ: уменьшение металлоемкости, габаритных размеров, температуры поверхностей, рост надежности, увеличение ресурсов работы и пр.

Однако выбор оптимального метода интенсификации теплообмена определяется многими условиями, которые в каждом конкретном случае должны быть учтены. Важнейшие из этих условий следующие [2]:

- 1) цели и задачи интенсификации теплоотдачи в данном конкретном классе ТУ;
- 2) допустимые энергетические затраты на интенсификацию теплообмена и вид располагаемой для этого энергии;
- 3) гидродинамическая структура потока, в котором требуется интенсифицировать теплоотдачу; характер распределения плотности тепловых потоков или поле температур в теплоносителе; доступные способы управления структурой потока;
- 4) технологичность изготовления ТУ с интенсификацией теплоотдачи, удобство и надежность в эксплуатации.

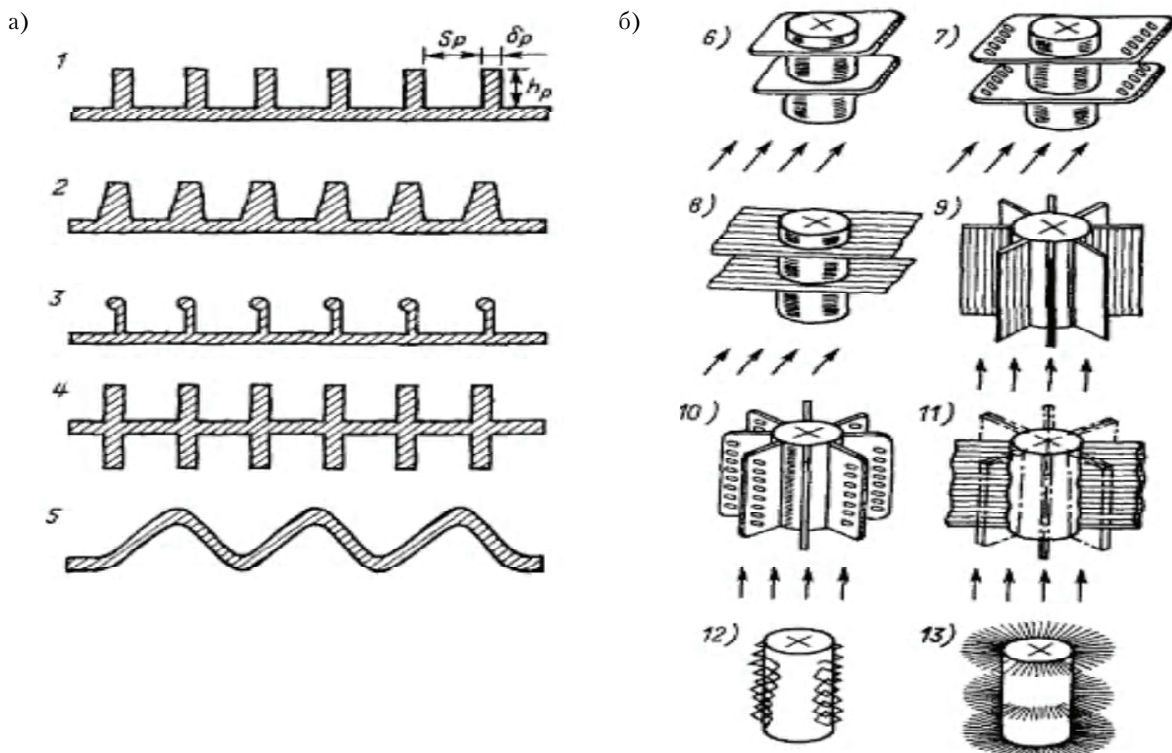
### *Пути совершенствования поверхностей теплообмена.*

Поиском путей совершенствования поверхностей и различным методам интенсификации конвективного теплообмена посвящено большое число работ [4]. Применение традиционных поверхностей теплообмена во многих случаях ведет к тому, что теплообменные аппараты имеют значительно завышенную площадь поверхности теплообмена.

Одной из особенностей статьи является попытка приложения методологии системотехнического подхода к анализу роли поверхности в эффективности процессов теплообмена. Необходимость этого подхода определяется комплексным рассмотрением всех факторов, определяющих свойства и структуру как собственно поверхности, так и всей пограничной поверхностной области, в которой проявляются эти свойства (и со стороны теплоносителя, и со стороны твердого тела) на микро- и макроуровнях.

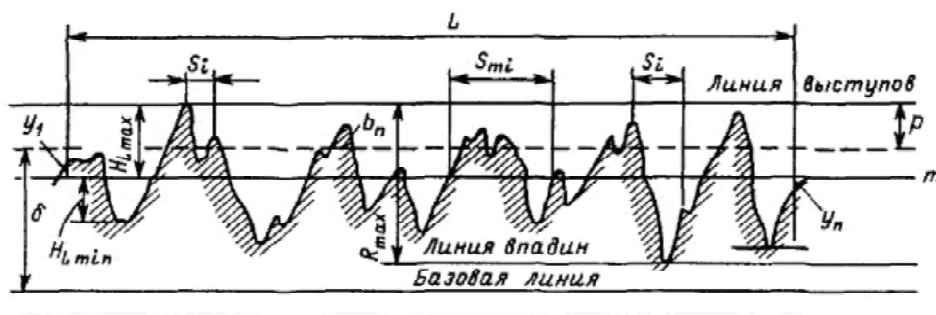
Макроструктура поверхности теплообмена в общем виде характеризуется наличием (или отсутствием) на поверхности каких-либо целенаправленных изменений геометрии путем технологических операций (гофрирование, выдавки, оребрение, ошиповка и др.). При их отсутствии принято называть поверхности технически гладкими. Характеристика макроструктуры технически гладких поверхностей ограничивается отклонениями формы от расчетных значений (например, для

круглых труб эллиптичностью по сечению, а по длине «бочкообразной» и другими отклонениями формы проходного сечения и внешней оболочки) (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Варианты развитых макроструктур поверхностей теплообмена: а) плоских стенок: 1, 2, 3 – одностороннее оребрение; 4 – двустороннее оребрение; 5 – гофрирование; б) наружных поверхностей труб, каналов и теплопроводящих стержней: 6, 7, 8 – поперечные ребра: 7 – перфорированные; 8 – гофрированные; 9, 10, 11 – продольные ребра: 10 – перфорированные; 11 – гофрированные; 12, 13 – с проволочными турбулизаторами: 12 – спиралевидными; 13 – вихреобразными.

Микрогеометрию твердых поверхностей характеризуют профильной шероховатостью и ее стереометрическим изображением. Профильная шероховатость представляется в виде геометрического изображения структуры разреза перпендикулярной плоскости поверхности (рисунок 2). Реальная профильная шероховатость определяется механическими, оптическими, ультразвуковыми, рентгеновскими, электронографическими и магнитометрическими методами [5]. Большинство этих методов дают вполне сопоставимые результаты определения параметров микроструктуры.



**Рисунок 2** – Основные характеристики профильной микрошероховатости поверхности твердого тела.

Как было показано в [3], в этом случае основное термическое сопротивление процессу теплоотдачи между стенкой и потоком сосредоточено в узком пристеночном слое толщиной 3...5 % от радиуса

трубы. Поэтому для того, чтобы получить при той же скорости потока существенное увеличение коэффициента теплоотдачи при умеренном росте коэффициента гидравлического сопротивления, нужно дополнительно турбулизовать только этот пристеночный слой. Дополнительная турбулизация ядра потока не дает заметного увеличения теплоотдачи, но существенно скажется на росте гидравлического сопротивления.

Эффективным способом турбулизации пристеночного слоя является создание у стенки отрывных зон. Периодически расположенные выступы плавной конфигурации обеспечивают генерации турбулентных вихрей, распространяющихся вдоль стенки и слабо диффундирующих в ядро потока. Высота выступов должна быть соизмерима с высотой пристеночного слоя, в котором сосредоточена основная часть термического сопротивления между потоком и стенкой.

Как показал анализ экспериментов, при заданной форме и высоте турбулизаторов максимальный рост теплоотдачи и гидравлического сопротивления достигается при  $t/h = 10$ , причем максимум гидравлического сопротивления сильно зависит от формы турбулизаторов и связанных с ней трехмерных и нестационарных вихревых структур.

Получить плавно очерченные периодически расположенные кольцевые диафрагмы внутри труб можно накаткой кольцевых диафрагм на наружной поверхности труб (рисунок 3). Интенсификация теплообмена в таких трубах будет зависеть от относительной высоты диафрагмы ( $h/D$ ) или отношения диаметра диафрагмы к диаметру трубы ( $d/D$ ) и относительного шага размещения диафрагм ( $t/h$  или  $t/D$ ). Помимо этих параметров на зависимости  $Nu/Nu_{гр}$  и  $\zeta/\zeta_{гр}$  влияет форма профиля, а при полукруглой форме профиля – радиус турбулизатора или безразмерный параметр  $R/D$ .

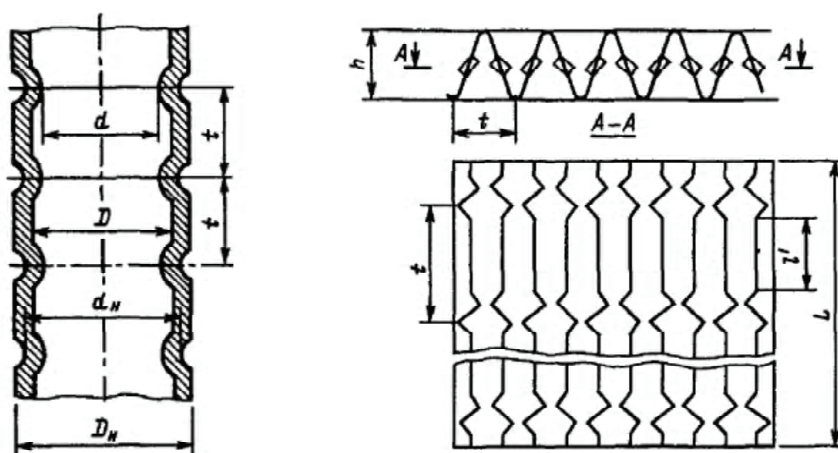


Рисунок 3 – Продольный разрез трубы с кольцевыми диафрагмами.

Технология изготовления ТА из накатанных трубок ничем не отличается от технологии сборки гладкотрубного ТА. Но суммарная длина трубок в теплообменнике с интенсификацией оказывается значительно меньше, чем в гладкотрубном. Поэтому интенсификация теплоотдачи рассмотренным методом позволила не только уменьшить в 1,5–2,0 раза габаритные размеры и массу ТА, но и существенно снизить его стоимость.

Деление методов интенсификации теплообмена пленочных аппаратов на активные и пассивные представляется, по существу, искусственным, поскольку все они без исключения требуют дополнительных затрат энергии на прокачку теплоносителя [6].

Применение поверхности с регулярной шероховатостью значительно (до 2 раз) повышает интенсивность процессов тепло-массопереноса [2].

Основные методы интенсификации теплообмена [4] сводятся к увеличению поверхности теплообмена (с помощью оребрения различной конфигурации), гидродинамическому воздействию на поток (закручивание потока с помощью вставок различного типа, акустическое воздействие, создание шероховатости), механическому воздействию на поток (вибрация и вращение поверхности), электрическому и магнитному воздействию на поток.

Совершенствование конструкций насадок с пленочным режимом контактирования идет по пути турбулизации пленки стекающей жидкости. Особого внимания заслуживают те варианты конструкций регулярных насадок, где обеспечено постоянное перераспределение потоков контактирующих

фаз между конструктивными элементами насадок, выравнивание профиля скоростей газа и жидкости по сечению аппаратов [1–4].

Отметим, что увеличение конвективного теплового потока может быть достигнуто и без интенсификации теплообмена, при помощи простого развития увеличения поверхности контакта фаз. Однако простое развитие поверхности предполагает увеличение теплового потока посредством использования простых форм оребрения (например, трубные пучки с прямыми сплошными гладкими ребрами, ориентированными вдоль течения). Это типично экстенсивный метод увеличения теплового потока, который не имеет больших резервов для дальнейшего развития, так как уже сейчас достигнуты практически предельные значения коэффициента оребрения и КПД ребра.

Интенсификация теплообмена, наоборот, является интенсивным методом увеличения теплового потока, возможности которого далеко не исчерпаны, и может быть осуществлена посредством воздействия на микроструктуру или на микро- и макроструктуру потока.

Следует заметить, что методы интенсификации теплообмена чрезвычайно многообразны. Физический механизм процессов в некоторых случаях изучен пока недостаточно или даже вообще не ясен. Поэтому любая систематизация по признаку механизма процесса будет неизбежно носить несколько схематичный характер. Кроме того, нередко интенсификация достигается за счет нескольких органически связанных основных и сопутствующих эффектов, действие которых отделить друг от друга практически невозможно.

С учетом сказанного под воздействием на микроструктуру потока будем понимать турбулизацию пограничного слоя на межфазной поверхности газожидкостной среды и его разрушение на поверхности насадочных элементов, а под воздействием на микро- и макроструктуру потока – создание вторичных течений и изменение физических свойств жидкости. Турбулизация пограничного слоя на поверхности насадки может быть осуществлена посредством создания на поверхности искусственной шероховатости различного вида. В случае песочной шероховатости осуществляется возмущение пристенной области течения, а в случае дискретной шероховатости (например выступов) – течение с локальными отрывами.

Более перспективной является вторая форма воздействия. Разрушение пограничного слоя может быть достигнуто с помощью разрывов поверхности, механического удаления и вращения поверхности. Это требует дополнительной энергии и практически в градирнях трудноосуществимо.

Известно, что применение шероховатых поверхностей с рациональными геометрическими характеристиками позволяет весьма существенно интенсифицировать процессы тепло- и массообмена как в однофазном, так и в двухфазном потоке. При этом на степень интенсификации процесса большое влияние оказывают шаг и высота элементов шероховатости.

Исследованию гидродинамических закономерностей течения пленки жидкости по шероховатой поверхности в условиях гравитационного стекания посвящен ряд работ [3]. Однако влияние шага и высоты элементов шероховатости на толщину пленки жидкости исследовано недостаточно.

Было установлено, что толщина пленки жидкости существенно зависит от шага и высоты элементов шероховатости, причем зависимость от шага имеет экстремальный характер.

Авторами [3] выяснялся характер влияния шероховатости вертикальной орошаемой стенки длиной 591 мм на теплоотдачу к нагреваемой пленке воды. При этом исследовались три трубы с различными видами искусственной шероховатости наружной орошаемой поверхности, а также сильно корродированная и гладкая труба. При использовании шероховатых труб истинная поверхность теплообмена за счет неровностей увеличивается.

Значительное влияние на теплоотдачу от шероховатых труб оказывает вид искусственной шероховатости, который в общем определяет и закономерности изменения теплоотдачи с ростом плотности орошения. Так, для трубы с поперечной накаткой (прямая 1) с увеличением критерия Рейнольдса пленки  $Re$  теплоотдача резко возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением плотности орошения турбулизирующее воздействие поперечных рисок шероховатости резко усиливается, и ламинарный подслой пленки уменьшается. При  $Re > 7\ 000$  теплоотдача от этой трубы при прочих равных условиях выше, чем для гладкой трубы с равной истинной поверхностью теплообмена и высотой трубы (рисунок 4).

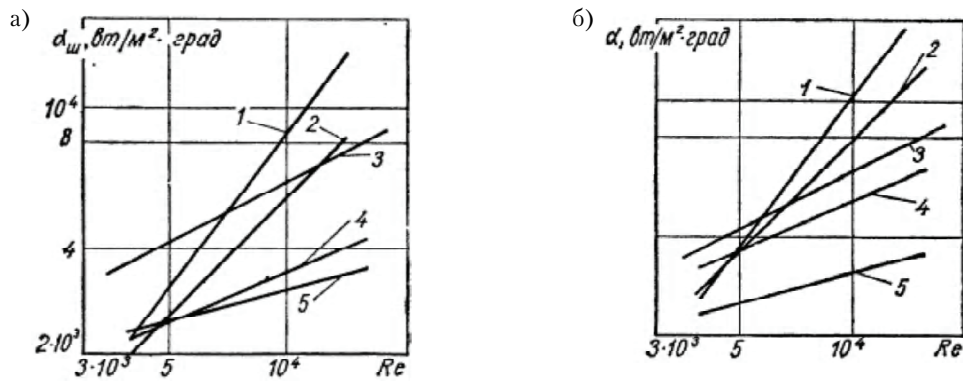
Теплоотдача от трубы с шахматной накаткой (прямая 2) ниже, чем для трубы с поперечной накаткой, причем эта разница в теплоотдаче увеличивается с ростом плотности орошения. При появлении продольных рисок, совпадающих с общим направлением течения пленки, турбулизирующее влияние бугорков неровностей уменьшается, возрастает ламинарный подслой пленки, увеличивая термическое сопротивление теплоотдаче.

Результаты опытов по теплоотдаче от шероховатых и гладких труб к пленке воды при температуре пленки равной 61,5 °С в виде эмпирических уравнений для  $\alpha_{ш}$  и  $\alpha$  также сведены в таблицу.

**Таблица** – Изменение среднего коэффициента теплоотдачи с увеличением Re

Накатка трубы	Критерий Рейнольдса Re	Увеличение коэффициента теплоотдачи ее по сравнению с $\alpha$ на гладкой поверхности трубы, %
Поперечная	6 000	4
	9 000	49,5
	12 000	96
Шахматная	7 000	2
	9 000	17
	12 000	37
Продольная	4000	13,5
	14 000	21

На рисунке 4 видно, что теплоотдача к пленке от сильно корродированной трубы (прямая 5) и трубы с продольной накаткой (прямая 4) при прочих равных условиях всегда ниже, чем теплоотдача к пленке воды от гладкой поверхности трубы (прямая 3).



**Рисунок 4** – Графики зависимости средних коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{ш}$  (а) и  $\alpha$  (б) от критерия Рейнольдса Re при  $t_{пл} = 61,5$  °С при различном состоянии орошаемых водой поверхностей стенок труб: 1 – поперечная накатка; 2 – шахматная накатка; 3 – гладкая; 4 – продольная накатка; 5 – сильно корродированная.

Очевидно, что при теплоотдаче к стекающей пленке жидкости искусственную шероховатость орошаемой стенки трубы следует рассматривать скорее как турбулизирующий фактор, чем простое увеличение поверхности теплообмена. Интенсификация теплоотдачи наблюдается только при использовании шероховатости орошаемой поверхности, неровности которой располагаются поперек основного направления течения пленки. При этом степень интенсификации теплоотдачи увеличивается с ростом плотности орошения.

*Влияние волн на теплоотдачу.*

В результате того, что волны на наружной поверхности пленки развиваются уже при незначительных плотностях орошения, во всей области значений критерия Рейнольдса  $Re > Re_{кр.в}$  перенос тепла в пленке молекулярной теплопроводностью сопровождается конвективным переносом за счет перемешивающего действия поверхностных волн. П. Л. Капица теоретически показал [3], что при волновом режиме течения теплоотдача на 21 % больше, чем при гладком ламинарном.

В своих работах Г. Глазер и В. Вильке отмечают, что воздействие волн меняет характер теплоотдачи от стенки к жидкостной пленке. Так, при стабилизированном ламинарном стекании пленки перенос тепла обусловлен только молекулярной теплопроводностью. Перемешивание пленки под действием волн приводит к возникновению дополнительного теплового потока волн в том же направлении [3].

Так как практически вся докритическая область течения орошающей пленки является волновой, то коэффициенты теплоотдачи должны быть выше, чем это следует из теории В. Нуссельта. Еще Г. М. Геббард и В. Л. Бэджер рекомендовали учитывать увеличение теплоотдачи за счет перемешивающего действия волн опытным коэффициентом  $\pm 1,25 \dots \pm 0,05$  по сравнению с теплоотдачей при гладком ламинарном течении. Последние более точные измерения Г. Струве хорошо подтверждают теоретические выводы П. Л. Капицы и Г. Глазера [3].

#### *Влияние входного участка на интенсивность теплообмена в пленке.*

На входном участке, начинающемся у распределительного устройствам кончающемся при появлении первых регулярных возмущений (установление профиля скоростей), жидкостная пленка ускоряется или замедляется с соответственным изменением ее толщины, в связи с чем интенсивность процессов тепло- и массообмена в этом месте также изменяется, что вызывает необходимость выделения входного участка. Особенно это касается тех случаев, когда длина входного участка соизмерима с длиной орошаемой поверхности. Естественно, что термический и концентрационный участок входа всегда несколько больше гладкого входного участка гидродинамической стабилизации, так как установление профиля скоростей предшествует образованию устойчивых профилей температур и концентраций в поперечном сечении пленки.

В связи с этим рассмотрение длины входного участка гидродинамической стабилизации при пленочном течении необходимо связывать с наиболее распространенными типами распределительных устройств.

При конструировании аппаратов с пленочным течением для улучшения равномерности распределения жидкости по рабочей поверхности необходимо уделять особое внимание подводу жидкости и комбинациям различных способов пленкообразования.

Так как равномерность распределения жидкости по сечению аппарата является одним из основных показателей, характеризующих эффективность пленочных аппаратов, создание устройств, обеспечивающих равномерное распределение жидкости по сечению аппарата является одной из важных задач конструирования аппаратов со стекающей пленкой.

Для обеспечения равномерного распределения пленки по внутренней поверхности нагревательных труб применяются внутренние устройства различных конструкций [7].

По способу распределения жидкости в пленку распределительные устройства классифицируются на переливные, щелевые, струйные, разбрызгивающие, капиллярные и тангенциальные, которые по способу стекания жидкости называют гравитационными.

Из существующих способов пленкообразования технических решений приходится на переливной способ, 25 % – на щелевой, 20 % – на тангенциальный и 8 % – на струйный [7]. В некоторых конструкциях используют комбинации перечисленных способов.

#### *Общие рекомендации по выбору метода интенсификации теплообмена.*

Можно произвести достаточно общую оценку эффективности интенсификации теплообмена [4]. При этом можно указать три критерия оценки эффективности интенсификации теплообмена:

1) сравнение поверхностей теплообмена или объема двух теплообменных аппаратов -одного с гладкими поверхностями и другого с приспособлениями для интенсификации теплообмена, при этом оба сравниваемых теплообменника должны иметь одинаковую тепловую мощность, расходы теплоносителя и потери давления на его прокачку;

2) сравнение тепловых мощностей теплообменников с интенсификацией теплообмена и без нее при одинаковых объемах, расходах теплоносителей и потерях давления на их прокачку, т. е. одинаковой мощности на прокачку;

3) сравнение мощностей или потерь давления на прокачку теплоносителей теплообменников с интенсификацией теплообмена и без нее при одинаковых объемах, тепловой мощности и расходах теплоносителей.

## ВЫВОДЫ

Уменьшение массы и габаритов теплообменных аппаратов является актуальной проблемой. Наиболее перспективный путь решения этой проблемы интенсификация теплообмена.

Опыт создания и эксплуатации различных тепломассообменных устройств показал, что разработанные к настоящему времени методы интенсификации теплообмена обеспечивают снижение габаритов и металлоемкости (массы) этих устройств в раза и более по сравнению с аналогичными

серийно выпускаемыми устройствами при одинаковой тепловой мощности и мощности на прокачку теплоносителей.

Чтобы убедиться в эффективности того или иного метода интенсификации, необходимы не только большой комплекс исследований, но и опыт эксплуатации ТУ в реальных условиях. Именно этим объясняется тот факт, что от разработки метода интенсификации теплообмена до его широкого использования в ТУ обычно проходит значительное время. А с другой стороны, лишь немногие из разработанных и публикуемых методов интенсификации теплообмена могут удовлетворить описанным выше условиям и найти широкое применение, хотя в отдельных специфических случаях применение некоторых из них может оказаться целесообразным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаптев, А. Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учебно-справочное пособие / А. Г. Лаптев, Н. А. Николаев, М. М. Башаров. – Москва : «Теплотехник», 2011. – 335 с. – ISBN 978-598457-104-3. – Текст : непосредственный.
2. Эффективные поверхности теплообмена / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, И. З. Копп, А. С. Мякотин. – Москва : Энерго-атомиздат, 1998. – 408 с. – ISBN 5-283-03593-X. – Текст : непосредственный.
3. Воронцов, Е. Г. Теплообмен в жидких пленках / Е. Г. Воронцов, Ю. М. Тананайко. – Киев : «Техника», 1972. – 196 с. – Текст : непосредственный.
4. Мартыненко, О. Г. Справочник по теплообменникам. Том 1 : [Перевод с английского под редакцией О. Г. Мартыненко]. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 560 с. – Текст : непосредственный.
5. Хусу, А. П. Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – Москва : «Наука», 1975. – 344 с. – Текст : непосредственный.
6. Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – [2-е изд., переработ. и доп.]. – Москва : Энергии, 1976. – 296 с. – Текст : непосредственный.
7. Бородин, В. А. Распыливание жидкостей / В. А. Бородин, Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, В. И. Ягодкин. – Москва : Машиностроение, 1967. – 264 с. – Текст : непосредственный.

Получена 08.10.2021

#### Д. В. САВИЧ, М. В. ДОЛГОВ ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ АПАРАТІВ ПЛІВКОВОГО ТИПУ ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**Анотація.** У статті проведено аналіз існуючих методів інтенсифікації теплообміну, конкретизовано основні умови вибору оптимального методу інтенсифікації, виконано аналіз шляхів удосконалення поверхонь теплообміну. Виділено та вивчено значні інтенсифікуючі фактори в апаратах плівкового типу, а саме – вплив хвилеутворення; зона вхідної ділянки, яка залежить від краплетвірного пристрою; мікроструктура поверхні труби, визначено найефективніший вид накатки на зовнішній поверхні труб. Наведено рекомендації щодо вибору методу інтенсифікації теплообміну. Короткий виклад сучасних уявлень про поверхні теплообміну показує, що пошуки шляхів оптимізації процесів та підвищення ефективності теплообміну вимагають комплексного системного розгляду як макро- та мікроструктури поверхні, так і умов взаємодії поверхні з теплоносієм у конкретних задачах. Необхідно відзначити, що при виборі для практичного застосування того чи іншого методу інтенсифікації теплообміну доводиться враховувати не тільки ефективність самої поверхні, а й технологічність її виготовлення, технологічність збирання теплообмінного апарата, вимоги міцності, забруднення поверхні, особливості експлуатації тощо.

**Ключові слова:** інтенсифікація, поверхня теплообміну, мікро- та макроструктура, плівкові апарати, хвилеутворення, штучна шерсткість, вхідна ділянка.

#### DARYA SAVICH, NYKOLAY DOLGOV INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN FILM-TYPE DEVICES Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article analyzes the existing methods of heat transfer intensification, specifies the main conditions for choosing the optimal intensification method, analyzes the ways to improve the heat transfer surfaces. Significant intensifying factors in film-type apparatuses have been identified and studied, namely,



the effect of wave formation; the zone of the input section, which depends on the droplet-forming device; the microstructure of the pipe surface, the most effective type of rolling on the outer surface of the pipes has been determined. Recommendations are given on the choice of a method for intensifying heat transfer. A brief summary of modern concepts of heat transfer surfaces shows that the search for ways to optimize processes and increase the efficiency of heat transfer requires a comprehensive systemic consideration of both the macro- and microstructure of the surface, and the conditions of interaction of the surface with the coolant in specific problems. It should be noted that when choosing for practical application one or another method of intensifying heat transfer, it is necessary to take into account not only the efficiency of the surface itself, but also the manufacturability of its manufacture, the manufacturability of the assembly of the heat exchanger, strength requirements, surface contamination, operation features, etc.

**Key words:** intensification, heat exchange surface, micro- and macrostructure, film devices, wave formation, artificial roughness, inlet section.

**Савич Дарья Владимировна** – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Долгов Николай Викторович** – кандидат технических наук; доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения.

**Савіч Дар'я Володимирівна** – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Долгов Микола Вікторович** – кандидат технічних наук; доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання.

**Savich Darya** – assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in systems of a heat-gas supply and ventilation.

**Dolgov Nikolay** – Ph. D. (Eng.); Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: saving of energy resources in systems of heat supplying.