

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОЧНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ

А.Ф. АЛИЕВ

*Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики
AZ – 1012, Баку, пр. Зардаби, 94*

Приводятся результаты исследования влияния параметров пленочного движения воды (толщина пленки, скорость ее движения, конструкции пленкообразователей) на коэффициент теплопередачи в трубках применительно к условиям работы адиабатных испарителей. Разработана методика измерения толщины пленки жидкости внутри теплообменных труб с помощью созданного прибора – электроконтактного измерителя.

Results of research of influence parameters movement of film-water (thickness of a film, speed of its movement, a design film-transformer) on factor of a heat transfer in tubes conformably to operating conditions of adiabatic evaporators are shown. The technique of measurement of thickness a film of liquid inside heat exchanging pipes by means of the created device - an electrocontact measuring instrument is developed.

В теплообменных аппаратах очень важно увеличение коэффициента теплопередачи, от величины которого зависит экономичность установки. Чтобы добиться интенсификации теплообмена необходимо по возможности увеличить тепловосприятие и теплоотдачу и снизить термосопротивление теплообменной поверхности при повышении турбулентности потоков теплового агента и нагреваемой жидкости.

При движении жидкости полным сечением в теплопередающей трубке возможность увеличения турбулентности потока ограничена, несмотря на увеличение скорости течения. Высокая турбулентность достигается только при создании тонкой пленки жидкости, стекающей в трубке под действием начальной скорости и гравитационной силы. По сравнению с обычными аппаратами пленочные теплообменники увеличивают общий коэффициент теплопередачи трубок в 7-10 раз, так как в них теплообмен происходит не со всей жидкостью, заполняющей сечение трубки, а только с пленкой воды, движущейся по внутренней поверхности трубки.

ма работы электроконтактного измерителя толщины пленки воды, где АВДС – теплообменная трубка. В небольшое отверстие на стороне ДС трубки вводится изолированная игла (за исключением кончика-контакта) микрометрического измерителя, который специальным зажимом закрепляется горизонтально на трубке. Толщина пленки замеряется на противоположной стенке АВ. Когда игла-контакт находится в зоне пленки, электрическая цепь замкнута, о чем свидетельствует миллиамперметр 3, при выходе иглы из зоны – цепь разрывается. По разности показаний контакт с внутренней стороной стенки АВ и разрыв контакта в момент выхода иглы из зоны пленки находится истинная толщина пленки.

На лабораторной установке (рис. 2) определялись параметры стекающей пленки (толщина пленки, расход и скорость жидкости). В напорную емкость 1 вставлялась латунная трубка 4 с пленкообразователем 2. Напор воды фиксировался манометром 3.

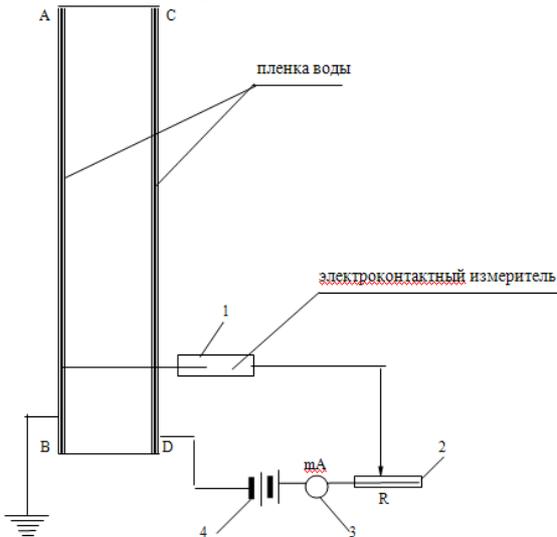


Рис. 1 Принципиальная схема работы электроконтактного измерителя толщины пленки жидкости

Нами разработан способ измерения толщины движущейся пленки жидкости (электролита) внутри теплообменной трубки. На рис. 1 показана принципиальная схема

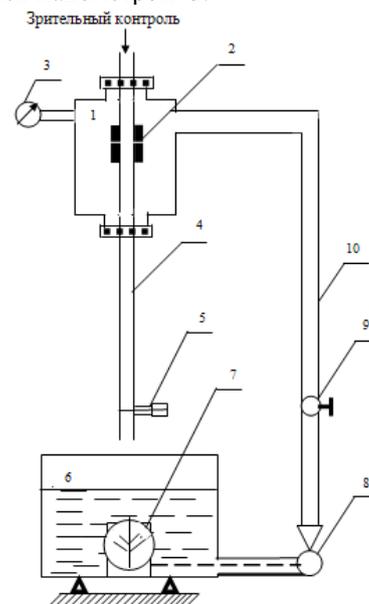


Рис. 2. Схема опытной установки. 1 – напорная емкость; 2 – пленкообразователь; 3 – манометр; 4 – опытная трубка; 5 – электроконтактный измеритель; 6 – бак; 7 – лампа; 8 – центробежный насос; 9 – вентиль; 10 – циркуляционная линия.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОЧНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ

Толщина пленки определялась электроконтактным измерителем 5. В бак 6 наливалась морская вода, которая снизу освещалась лампой 7. Посредством центробежного насоса 8 морская вода по линии 10 попадала в напорную емкость.

Стекающая по опытной трубке вода попадала в бак, что обеспечивало рециркуляцию. Вентиль 9 служил для изменения напора воды на входе в пленкообразователь. Лампа 7 освещала внутреннюю часть трубки, что позволяло вести зрительный контроль процесса.

Первая серия опытов проводилась на трубе длиной 2,5 м и внутренним диаметром 27 мм. Сначала определялась скорость воды при течении ее полным сечением при полностью открытом вентиле. Затем в напорную емкость вставлялись различные пленкообразователи и измерялась толщина пленки $\delta_{пл.}$ на конце трубы при различных напорах воды.

В качестве пленкообразователей изучались две конструкции: 1) тангенциальные круглые отверстия, просверленные на самой опытной трубке и 2) вкладыши с вращательно-поступательными канавками.

На рис. 3 показана зависимость толщины пленки от входного напора воды на конце опытной трубки при пленкообразователе с тремя тангенциальными отверстиями по поперечному сечению трубки и диаметром каждого отверстия в 3 мм. Из этого графика видно, что при малых напорах (до 5-6 м водяного столба) толщина пленки с повышением напора растет почти линейно. При больших напорах с увеличением расхода толщина пленки увеличивается медленнее, а при напорах 12-18 м водяного столба толщина почти не изменяется, хотя расход воды возрастает значительно. Это говорит о том, что тангенциальные круглые отверстия при рабочих напорах воды в системе обеспечивают устойчиво турбулизирующую пленку жидкости, что очень важно для стабильной работы установки.

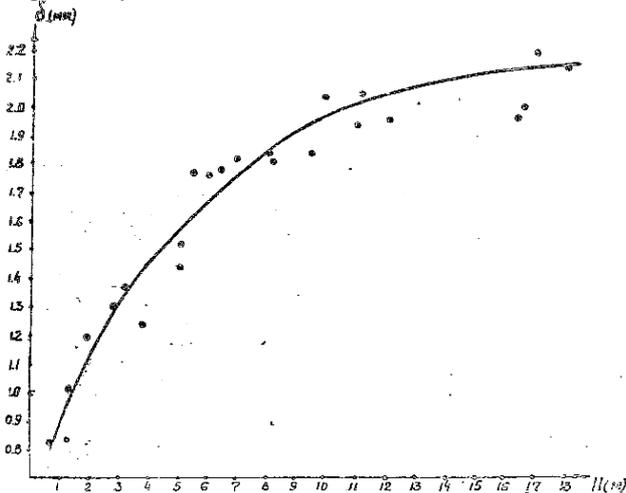


Рис.3 Зависимость толщины пленки морской воды от входного напора.

Оба типа пленкообразователей обеспечивали вращательно-поступательное движение пленки. Зрительный контроль, как и следовало ожидать, установил, что пленка раскручивается по всей длине трубки.

Если в верхней части трубки количество гребней волны пленки велико, то в нижней части их гораздо меньше, и они расположены дальше друг от друга. Это под-

твердило и измерение толщины пленки вдоль длины опытной трубки. Точность измерения толщины пленки в нижней части трубы была больше, чем в верхней, т.к. частота колебаний волны по мере стекания пленки уменьшалась.

Измеренное значение толщины пленки. $\delta_{пл.}$ воды позволило легко подсчитать продольную составляющую скорости пленки v_e в точке замера следующим образом. Если, d – внутренний диаметр трубки, а $S_{пл}$ – площадь поперечного сечения движущейся внутри трубы пленки, то

$$v_e = \frac{Q}{S_{пл}} \quad (1)$$

где Q – расход воды при стационарном режиме движения, определяемый объемным способом, в $м^3/с$

$$S_{пл} = S_1 - S_2 = \pi \frac{d^2}{4} - \pi \frac{(d - 2\delta)^2}{4} = \pi \delta (d - \delta) \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$v_e = \frac{Q}{\pi \delta (d - \delta)} \quad (3)$$

Начальная скорость истечения струй из отверстия пленкообразователя подсчитывалась по общеизвестной формуле:

$$v_o = \mu \sqrt{2gH} \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода, определяемый опытным путем; g – ускорение свободного падения, в $м/с^2$; H – напор воды, в м.

На рис. 4 кривая 1 – динамика изменения продольной скорости течения пленки с увеличением напора на конце трубы, а кривая 2 – изменение начальной скорости истечения пленки из тангенциального отверстия.

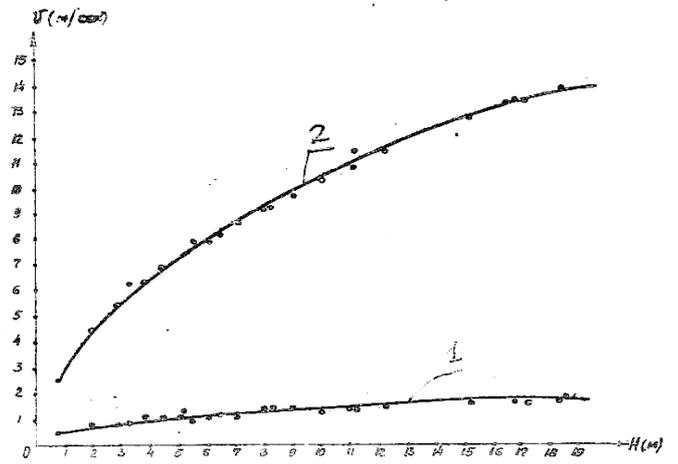


Рис.4 Зависимость скорости пленки от входного напора.

При сопоставлении кривых видно, что продольная скорость пленки на конце трубы изменяется с увеличением напора гораздо меньше, чем начальная скорость истечения из тангенциального отверстия пленкообразователя. Если при изменении напора от 0,7 атм до 1,85 атм v_o увеличивается от 2,6 м/с до 14 м/с, то v_e увеличивается от 0,6 м/с до 1,8 м/с.

Расход воды при ее течении полным сечением для установившегося потока оказался равным $4,08 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$, а при стекании пленки через 3 тангенциальных отверстия, диаметром по 3 мм – $3,06 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$. Соответственно скорость течения воды в первом случае была 0,7 м/с, а во втором – 1,8 м/с. Таким образом, наличие пленкообразователя снижало расход воды на 25%, но зато скорость движения на конце опытной трубки при этом увеличивалась в 2,6 раза.

Замеры толщины пленки по длине трубки показали, что при одних и тех же напорах воды на входе в пленкообразователь минимальная толщины пленки оказывается в средней части трубы, максимальная - в верхней части.

Среднюю скорость стока пленки внутри трубы легко подсчитать при учете формул (3) и (4).

Режим движения пленки жидкости зависит от значения критерия Рейнольдса (Re)

$$Re = \frac{v_{cp} \cdot \ell}{\nu} \quad (5)$$

где v_{cp} - характерная для данного движения средняя скорость, в м/с; ℓ - характерный для данного движения размер, в м; ν - кинематическая вязкость, в $\text{м}^2/\text{с}$.

Кинематическая вязкость воды Каспийского моря, с которой проводились опыты, была определена вискозиметром при различных температурах нагрева. Результаты этих опытов показаны в табл. 1.

При движении жидкости полным сечением внутри цилиндрической трубы характерным размером для формулы Рейнольдса (Re) являются диаметр трубы d , поэтому формула (5) принимает вид:

$$Re = \frac{v_{cp} d}{\nu} \quad (6)$$

В случае движения жидкости пленкой внутри трубы некоторые авторы [1] рекомендуют формулу:

$$Re = \frac{v_{cp} d}{4\nu} \quad (7)$$

В формуле (7) вместо диаметра трубки подставлено значение гидравлического радиуса R , равного $d/4$, более широко определяющего линейную характеристику потока.

Принято, что при $Re < 2300$ жидкость движется ламинарно, а при $Re > 2300$ – режим движения турбулентный. Значение $Re = 2300$ определяется как критическое число Рейнольдса. Иногда вводится понятие переходного ($2300 < Re < 10000$) движения и турбулентным считают движение при $Re > 10000$ [2]. По данным [3] для течения в цилиндрических трубах критическое число Рейнольдса равняется приблизительно 1000 - 1100.

В наших опытах вычисленные значения критериев Рейнольдса для тангенциальных пленкообразователей по формуле (7) показали, что даже при минимальных напорах на входе в пленкообразователь (порядка 1 – 2 м водяного столба) число Рейнольдса превышает значения $Re = 2300$. Визуальное наблюдение и показания электроконтактного измерителя толщины пленки подтвердили, что пленка морской воды внутри теплообменной трубы стекает волнообразно по раскручивающейся спирали, что несомненно говорит о том, что характер движения турбулентный. При более больших напорах (приблизительно от 5 м до 10 м водяного столба) гребни и впадины волны гораздо большие и наблюдаются локальные разбрызгивания воды от пленки. При максимальных напорах (до 20 м водяного столба) турбулентность течения настолько интенсивная, что наблюдается вспенивание конуса пленки на выходе из трубки.

Толщина пленки воды замерялась также на выходе латунной трубки длиной 2,5 м, внешним диаметром 30 мм и толщиной стенки 1,5 мм при наличии различных пленкообразователей: фторопластовый вкладыш с 3-мя винтообразными канавками, насадки с различным числом и размером тангенциальных круглых отверстий. Оба типа турбулизаторов обеспечивали вращательно-поступательное движение пленки воды внутри трубок. Давление воды на выходе в теплообменную трубку доводилось до 1,90 атм.

Всего исследовались пять пленкообразователей. В табл. 2 показаны результаты опытов с насадками из тангенциальных отверстий.

Таблица 2.

Измеренные значения толщины пленки воды при использовании различных пленкообразователей.

Тип и размер отверстий пленкообразователя	Насадка с 2-мя тангенциальными отверстиями по 2,5мм	Насадка с 3-мя тангенциальными отверстиями по 2,7 мм	Насадка с 3-мя тангенциальными отверстиями по 3 мм
Расход воды Q, л/с	0,061	0,090	0,306
Толщина пленки δ , мм	2,07-2,28	1,463- 1,57	2,15--2,21

Таблица 3.

Значения толщины пленки жидкости при различных напорах на входе в пленкообразователь

P, атм	0,125	0,280	0,500	0,600	0,700	0,900	1,100	1,23	1,52	1,70	1,85
Q, л/с	0,054	0,101	0,135	0,157	0,172	0,204	0,223	0,245	0,261	0,272	0,297
δ , мм.	0,84	1,31	1,45	1,70	1,83	1,88	1,93	1,96	2,01	2,12	2,18

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОЧНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ

Опыты показали, что при очень малых тангенциальных отверстиях (порядка 1 - 1,5 мм) расход воды резко снижается и, следовательно, их исследование не представляет практического интереса. С увеличением напора увеличивается волна пленки и при давлениях 1.6–1,9 атм. размер волны составляет приблизительно 20 -30% толщины пленки. Как и следовало ожидать, с увеличением напора на вход в пленкообразователь с ростом расхода воды в трубке увеличивается и толщина пленки. В табл. 3 показаны результаты этих измерений. В качестве пленкообразователя применялась насадка с тремя тангенциальными отверстиями по 3 мм каждая.

Опыты на теплопередачу во избежание накипиобразования проводились с дистиллированной водой. Наружный и внутренний диаметры трубки соответственно равнялись 32 мм и 28 мм, длина 2,8 м. На этой трубке исследовалась теплопередача сначала при стекании пленки, создаваемой вкладышем с 3-мя винтообразными канавками 2 x 3 мм, а затем при пленкообразователе с 2-мя тангенциальными отверстиями по 3 мм в сечении. При одних и тех же условиях вкладыш образовывал пленку с начальной скоростью, изменяющейся от 5 м/с до 6,4 м/с, а насадка с тангенциальными отверстиями от 7,7 м/с до 10,9 м/с.

Во время опытов при помощи эжектора создавались вакуумы, соответствующие кипению воды от 80°C до 100°C. Результаты опытов показаны в табл. 4. Для сравнения можно привести следующие данные. В работах американских ученых Стандифорда и Бьерка с тонкопленочными испарителями коэффициенты теплопередачи зависели в основном от температуры кипения и менялись от 1700–1950 при температуре около 40°C до 3400 – 3900 ккал/м²·ч °C при 120°C [4]

Таблица 4.

Значения коэффициентов теплопередачи, при использовании различных пленкообразователей

Температура, °C	80	85	90	95	100
Коэффициенты теплопередачи, ккал/м ² ·ч °C					
1) при вкладыше с 3-мя канавками	1752	1833	2930	3051	3507
2) при насадке с тангенциальными отверстиями	3082	3700	3500	3740	4225

- [1]. *Е.Д.Мальцев*, Опреснение соленых вод, Атомиздат, М., 1965.
[2]. *И.Э.Апельцин, В.А.Клячко*, Опреснение воды, Изд. лит. по строительству, М., 1968.
[3]. *Н.Е.Кочин, И.А.Кибель, Н.В. Розе* Теоретическая гидромеханика, Гос. издат. физ-мат. лит. М., 1963.

- [4]. *Ф.К.,Стандифорд, Х.Б.Бьерк*, Испарение морской воды в длиннотрубных вертикальных испарителях, Сб. Опреснение соленых вод, Изд. иностр.лит., М., 1983, с. 153.

Received: 10.02.2007