

УДК 536.24

Н. П. Саевич, Д. Г. Калишук, А. И. Ершов**ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КИПЕНИЯ ВОДЫ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ**

Приведены результаты экспериментальных исследований интенсификации теплообмена при кипении воды за счет ввода острого пара. Определено влияние различных параметров на степень интенсифицирующего эффекта. Получено уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости в вертикальной трубе с подводом острого пара на их начальном участке.

Энергоемкость многих производственных процессов может быть снижена за счет рекуперации и утилизации тепла технологических потоков, сред. Утилизация вторичных энергоресурсов (ВЭР) высокого потенциала не требует существенных дополнительных материальных затрат и широко используется при проектировании новых и реконструкции устаревших предприятий. При наличии ВЭР низкого потенциала (например, тепло паров низкого давления) прямое их использование затруднительно из-за малого значения движущей силы теплообмена. Поэтому для осуществления подобных проектов требуются дорогостоящие с большими поверхностями теплопередачи аппараты. Для удешевления технологий рекуперации и утилизации тепла ВЭР низкого потенциала, в первую очередь за счет снижения капитальных затрат на их реализацию, расширения круга их применения, необходима интенсификация теплообмена.

Если в процессе утилизации ВЭР низкого потенциала принимающим теплоносителем является кипящая жидкость, а отдающим – конденсирующийся пар (процессы выпаривания, перегонки и ректификации, теплообмена в холодильной технике, переработки пищевых продуктов и др.), то при малых температурных напорах между ними общую интенсивность процесса, как правило, лимитирует интенсивность теплоотдачи в кипящей жидкости. Для снижения общего термического сопротивления необходимо интенсифицировать кипение, поэтому разработка и исследование новых методов интенсификации теплообмена при кипении представляют значительный научный и практический интерес.

В работе [1] дан обзор различных конструктивных и технологических методов интенсификации кипения, в том числе за счет диспергирования газа в кипящую жидкость. Интенсификация кипения также достигается при диспергировании острого пара в кипящую жидкость [2, 3], но результаты исследований этого метода в указанных публикациях не представлены.

Нами были проведены экспериментальные исследования интенсификации кипения жидкости в вертикальной трубе с вводом острого пара на экономайзерном участке. Выбор вертикальной трубы в качестве объекта исследований обоснован тем, что она является элементом наиболее распространенного типа трубчатых испарителей. Результаты поисковых исследований [4, 5] свидетельствуют об увеличении коэффициента теплопередачи при вводе острого пара в кипящую жидкость до 50%. При этом установлено, что на степень интенсификации влияют температурный напор, уровень жидкости, расход острого пара.

С целью детализации влияния различных параметров на интенсивность кипения, получения локальных характеристик процесса была создана экспериментальная установка и отработана методика проведения опытов [6]. Исследовательской ячейкой являлся вертикальный однотрубный испаритель с контуром естественной циркуляции. Процесс кипения осуществлялся в медной трубе с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 4 мм. Высота обогреваемого участка 1 м. В стенке трубы на различных уровнях завальцованы термомпары. В качестве модельной жидкости использовалась дистиллированная вода. Избыточное давление пара над кипящей жидкостью не превышало 1 кПа при барометрическом давлении в пределах 97–100 кПа. В качестве острого пара применялся водяной насыщенный пар давлением 110–200 кПа.

Исследования проводились при следующих относительных уровнях светлой жидкости в трубе: 0.35, 0.50, 0.63, 0.75. Относительный расход острого пара β при проведении опытов изменялся от 0.15 до 0.5. Он определяется как отношение расходов острого пара к получаемому за счет внешнего обогрева без интенсификации при тех же режимных параметрах (уровне светлой жидкости, температурном напоре). Температурный напор в кипящей жидкости (разность температур поверхности стенки трубы и насыщения жидкости) ΔT устанавливался в пределах 2.5–11.5 К.

На первом этапе исследований была проведена серия опытов без интенсификации теплообмена. При этом определено влияние высоты уровня светлой жидкости в кипящей трубе h и температурного напора ΔT на интенсивность теплообмена.

Для устранения эффекта приработки поверхности нагрева и получения стабильных результатов кипящая труба подвергалась длительной эксплуатации (десять часов) при кипении модельной жидкости.

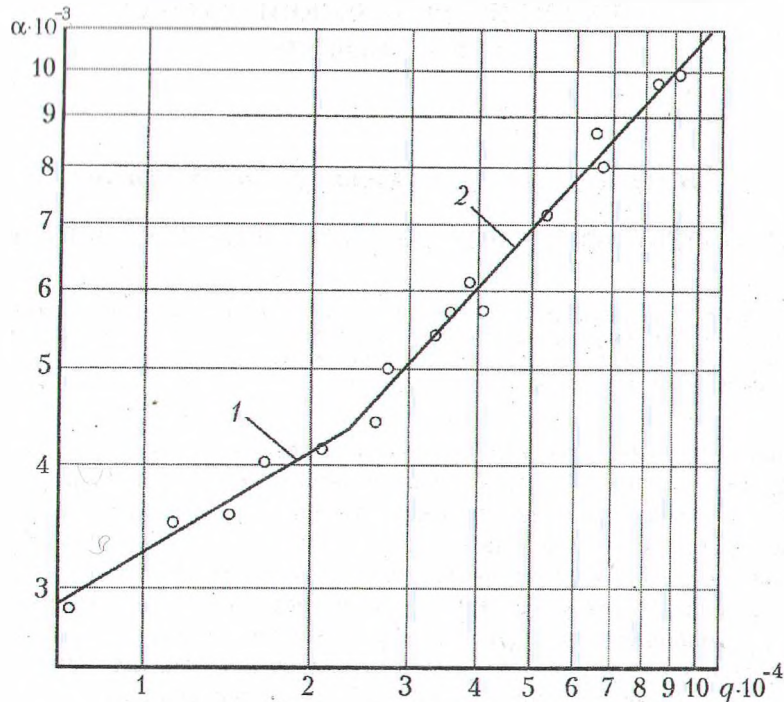


Рис. 1. Обработка опытных данных по кипению без острого пара в координатах $\alpha = f(q)$ при оптимальном h : 1 - $\alpha = 142.5q^{0.34}$; 2 - $9.1q^{0.61}$. α , Вт/(м²·К); q , Вт/м²

С целью исключения влияния гистерезиса по тепловому потоку при малых температурных напорах серии опытов проводились только с использованием прямого хода (при постепенном увеличении плотности теплового потока).

Опытные значения коэффициента теплоотдачи при кипении α определялись по известному уравнению Ньютона–Рихмана как отношение плотности теплового потока q к разности температур поверхности стенки $T_{ст}$ и кипения T_0 . Температура поверхности нагрева со стороны кипящей жидкости принималась как среднеарифметическое показаний термопар, зачеканенных в стенку кипячительной трубы.

Интенсивность теплообмена при кипении зависит от большого количества разнообразных факторов, влияние которых часто не поддается точной оценке.

Многочисленными исследованиями установлено, что при кипении в большом объеме и трубах влияние плотности теплового потока на теплообмен является определяющим и характеризуется следующей эмпирической зависимостью:

$$\alpha = f(q) = Cq^n \quad (1)$$

График (1), полученный на основании обработки результатов собственных экспериментальных исследований для оптимального уровня светлой жидкости в кипячительной трубе, изображен на рис. 1. Он имеет характерный излом на границе зон конвективной передачи тепла ($\alpha \sim q^{0.34}$) и развитого пузырькового кипения ($\alpha \sim q^{0.61}$).

Полученные эмпирические уравнения имеют простой вид, но не отражают влияния различных параметров на интенсивность теплообмена и, следовательно, имеют узкие пределы применимости. Более ценными представляются уравнения в критериальной форме, позволяющие распространить полученные результаты опытов на подобные процессы.

Были проанализированы расчетные соотношения для определения коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объеме и трубах, полученные на основе анализа размерностей, теории термодинамического подобия, теоретических и полуэмпирических методов. При этом были использованы расчетные зависимости Г. Н. Кружилина [7], С. С. Кутателадзе [8], М. А. Кичигина–Н. Ю. Тобилевича [9, 10], В. И. Толубинского [11] и ряда других исследователей [12–15].

Выявлено, что большинство данных различных экспериментаторов, а также данные собственных исследований процесса кипения в области развитого пузырькового кипения с наименьшей погрешностью обобщаются двумя критериальными системами, предложенными М. А. Кичигиным и Н. Ю. Тобилевичем, и В. И. Толубинским соответственно:

$$Nu = C_1 Pe_u^m Ga^{0.05} K_p^{0.84} \quad (2)$$

$$Nu = C_1 K^m Pr^{-0.2} \quad (3)$$

В развернутом виде указанные критериальные системы представлены формулами

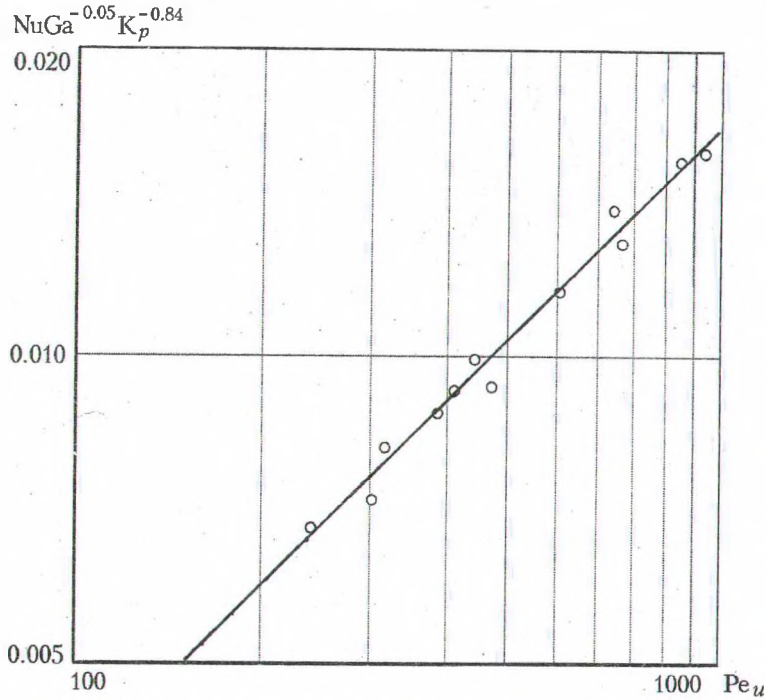


Рис. 2. Обработка опытных данных по кипению без острого пара

$$\frac{\alpha l_0}{\lambda} = C_1 \left(\frac{q l_0}{r p'' a} \right)^m \left(\frac{g l_0^3}{v^2} \right)^{0.05} \left(\frac{p l_0}{\sigma} \right)^{0.84} \quad (4)$$

$$\frac{\alpha l_0}{\lambda} = C_1 \left(\frac{q}{r p'' \omega''} \right)^m \left(\frac{v}{a} \right)^{-0.2} \quad (5)$$

где $l_0 = \sqrt{\sigma/g(\rho' - \rho'')}$ – определяющий линейный размер, пропорциональный отрывному диаметру парового пузыря.

Результаты обработки опытных данных, полученных авторами, с применением критериальной системы Кичигина-Тобилевича приведены на рис. 2. Из него видно, что экспериментальные точки удовлетворительно

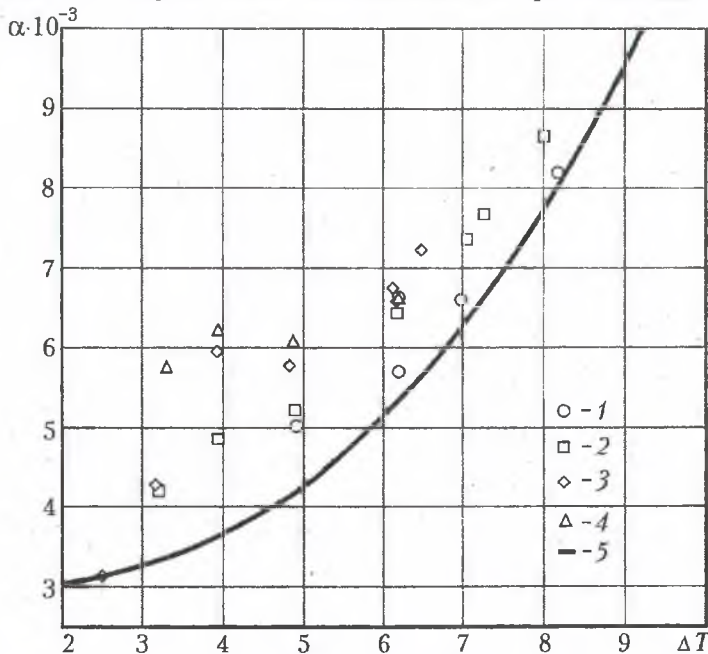


Рис. 3. Зависимость α от ΔT при $h = 0.5$: 1 – $\beta = 0.15$; 2 – 0.25; 3 – 0.33; 4 – 0.50; 5 – ∞ . α , Вт/(м²К); ΔT , °С

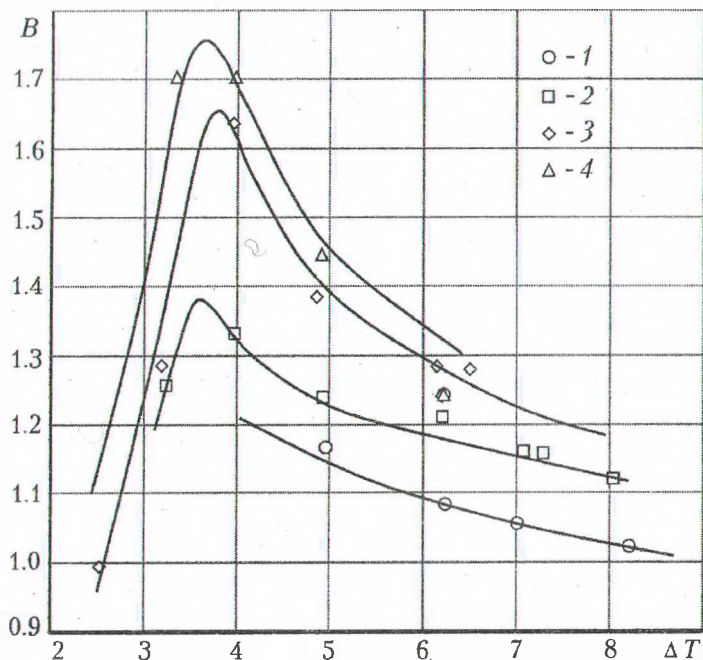


Рис. 4. Зависимость $B = \alpha_n / \alpha$ от ΔT при $h = 0.5$: 1-4 – обозначения те же, что на рис. 3. ΔT , °C

группируются вдоль усредняющей прямой, описываемой уравнением $Nu Ga^{-0.05} K_p^{-0.84} = 2.4 \cdot 10^{-4} Re_m^{0.61}$. Аналогичные результаты с отклонением экспериментальных данных от расчетных не выше 7% получены при использовании критериальной системы В. И. Толубинского.

Обобщение представлено нами уточненными безразмерными уравнениями

$$Nu = 2.39 \cdot 10^{-4} Re_m^{0.61} Ga^{0.05} K_p^{0.84} \tag{6}$$

$$Nu = 68 K^{0.61} Pr^{-0.2} \tag{7}$$

На втором этапе исследований проводились опыты с подводом острого пара в кипящую жидкость. При этом изучалось влияние количества подводимой легкой фазы на степень интенсификации теплообмена.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3 в виде зависимостей $\alpha = f(\Delta T, \beta)$ при $h = 0.5$. Подвод острого пара в жидкость способствует повышению коэффициента теплообмена при кипении, причем с увеличением β степень интенсификации возрастает. Влияние плотности теплового потока на коэффициент теплоотдачи при этом неоднозначно. При достижении некоторой критической величины q , значение которой меньше плотности теплового потока, соответствующей переходу из свободно-конвективной зоны в зону пузырькового кипения, резко увеличивается коэффициент теплоотдачи. Дальнейшее увеличение q приводит к снижению интенсифицирующего эффекта, причем коэффициент теплоотдачи остается на 10–15% выше, чем при кипении без подвода острого пара при одних и тех же режимных параметрах.

В ходе исследований также установлено, что положительное воздействие ввода острого пара возрастает при увеличении уровня светлой жидкости в кипяtilьной трубе. Однако этот рост незначителен при уровнях жидкости выше оптимального.

Коэффициент теплоотдачи при кипении воды и разбавленных водных растворов с вводом острого пара α_n предлагается определять по формуле

$$\alpha_n = B \alpha \tag{8}$$

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости коэффициента B от температурного напора ΔT при различных значениях β и $h = 0.5$. Установлено, что наиболее бурный рост интенсивности теплоотдачи при вводе острого пара в кипящую жидкость по сравнению с ее интенсивностью без ввода острого пара наблюдался при $\beta = 0.25-0.33$. При повышении β от 0.33 до 0.5, так же, как и при $\beta < 0.25$, относительное приращение коэффициента теплоотдачи незначительно.

При обобщении результатов экспериментальных исследований интенсификации теплообмена при кипении жидкости в вертикальной трубе с вводом острого для оптимальных режимов ведения процесса получено эмпирическое уравнение

$$B = 12.1 \beta^{0.152} q^{-0.196} \tag{9}$$

Расчетная зависимость (8) с учетом (6), (7) и (9) принимает вид

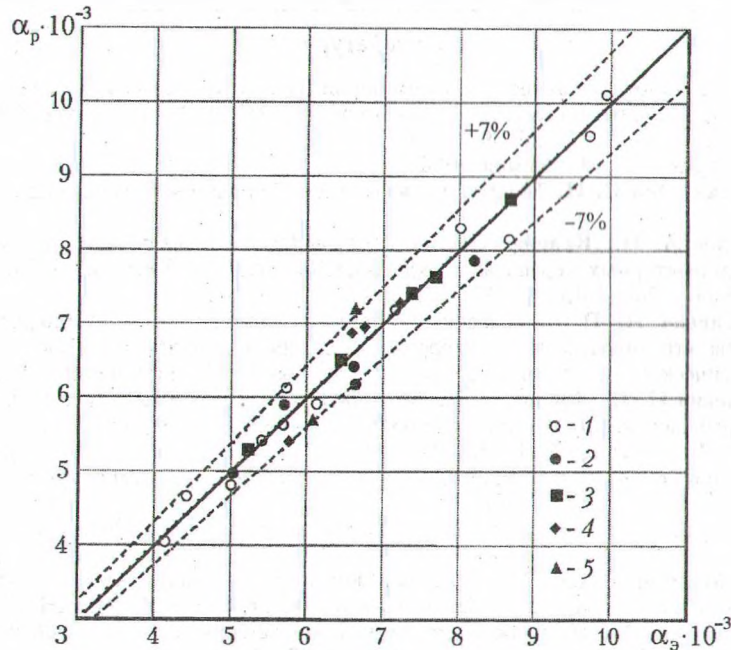


Рис. 5. Корреляция значений α_i уравнением (10): 1 - $\beta = 0$; 2 - 0.15; 3 - 0.25; 4 - 0.33; 5 - 0.50. $\alpha_p, \alpha_э$, Вт/(м²·К)

$$\alpha_i = B \frac{\lambda}{l_0} 2.39 \cdot 10^{-4} Re_u^{0.61} Ga^{0.05} K_p^{0.84} \quad (10)$$

или

$$\alpha_i = B \frac{\lambda}{l_0} 68 K^{0.61} Pr^{-0.2} \quad (11)$$

При $\beta = 0.1-0.5$, $q = 20-80$ кВт/м² относительное отклонение значений α_i , рассчитанных по (10) и (11), от экспериментальных не превышает 7%, что подтверждается корреляционным графиком, представленным на рис. 5.

Полученные критериальные уравнения могут быть рекомендованы для инженерных расчетов интенсифицированных вертикальных испарителей с вводом острого пара в кипящую жидкость.

Выводы

Проведенный анализ современного состояния исследований интенсификации теплообмена в совокупности с результатами собственных экспериментальных исследований авторов позволил установить следующее:

- 1) подвод острого пара в кипящую жидкость является эффективным способом увеличения коэффициентов теплообмена при малых температурных напорах;
- 2) изменение характера теплообмена за счет "взрывного" увеличения коэффициентов теплоотдачи при вводе острого пара возникает при меньших температурных напорах, чем критические температурные напоры перехода от свободно-конвективного режима кипения к пузырьковому;
- 3) интенсифицирующее воздействие на теплообмен возрастает при увеличении относительного расхода острого пара и максимально при кипении воды в диапазоне температурного напора 3-6 К;
- 4) за счет ввода острого пара в кипящую жидкость можно добиться увеличения коэффициентов теплоотдачи в 1.5-2 раза.

Обозначения

a - коэффициент температуропроводности, м²/с; g - ускорение свободного падения, м/с²; h - относительная высота уровня светлой жидкости в кипяtilьной трубе; l_0 - определяющий геометрический размер, м; m, n, C, C_1 - коэффициенты; p - абсолютное давление вторичного пара над кипящей жидкостью, Н/м²; q - плотность теплового потока, Вт/м²; r - удельная теплота парообразования, Дж/кг; B - коэффициент степени интенсификации теплообмена; Ga, K, Nu, Re, Pr - критерии Галилея, Якоба-Толубинского, Нуссельта, Пекле, Прандтля соответственно; K_p - критерий давления; Re_u - критерий Пекле для процесса кипения; T_0 - температура кипения жидкости, К; $T_{ст}$ - температура поверхности стенки трубы, К; α и α_i - коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящей жидкости без интенсификации и с интенсификацией острым паром, Вт/(м²·К); α_p и $\alpha_э$ - расчетные и экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи, Вт/(м²·К); β - относительный расход острого пара; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ρ' - плотность жидкости, кг/м³; ρ'' - плотность пара, кг/м³; σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; ω'' - скорость роста парового пузыря, м/с; ΔT - температурный напор, К. Индексы: и - интенсифицированный; p - расчетный; ст - стенка; э - экспериментальный; ' - жидкость; '' - пар.

Литература

1. Дрейцер Г. А. Современное состояние исследований интенсификации теплообмена в каналах и перспективы создания компактных теплообменных аппаратов//Тепломассообмен ММФ-96: III Минский междунар. форум, 20-24 мая 1996 г. Минск, 1996. Т. 10, ч. 1. С. 26-39.
2. Трубин Е. И. Выпаривание. М.: Химия, 1982.
3. Федоскин Н. М., Ткаченко С. И. Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах. Киев: Техника, 1975.
4. Сисевич Н. П., Ершов А. И., Калишук Д. Г. Влияние диспергирования пара в жидкость на интенсивность теплообмена при малых температурных перепадах между теплоносителями//Тепломассообмен ММФ-96: III Минский междунар. форум, 20-24 мая 1996 г. Минск, 1996. Т. 7, ч. 1. С. 54-59.
5. Калишук Д. Г., Саевич Н. П.// Исследование теплообмена при малых температурных перепадах между теплоносителями и аспекты его применения в энергосберегающих технологиях// Минск, 2000. С. 228-236. (Тр. Белорусского гос. технологического ун-та. Вып. 8. Химия и технология неорганических веществ.)
6. Калишук Д. Г., Саевич Н. П., Ершов А. И. Особенности теплообмена, рекуперации и утилизации тепла при малых температурных перепадах между теплоносителями// Тепломассообмен ММФ-2000. IV Минский междунар. форум, 22-26 мая 2000 г. Минск, 2000. Т. 11. С. 104-108.
7. Кружинин Г. Н. Теплоотдача от поверхности нагрева к кипящей однокомпонентной жидкости при свободной конвекции//Изв. АН СССР. 1948. № 7. С. 967-980.
8. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Кичигин М. А., Тобилевич Н. Ю. Об обобщении экспериментальных данных по теплообмену при кипении// Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 175-185.
10. Петренко Ю. Д., Сагань И. И. Обобщение данных по теплообмену при кипении сахарных растворов в кольцевых каналах//Изв. вузов. Пищевая технология. 1972. № 3. С. 156-159.
11. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. Киев: Наукова думка, 1980.
12. Боришанский В. М., Козырев А. П., Светлова Л. С. Изучение теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей// Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках/Под ред. В. М. Боришанского и И. И. Палева. М.-Л., 1964. С. 71-104.
13. Лабунцов Д. А. Обобщенные зависимости для теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости//Теплоэнергетика. 1960. № 5. С. 76-81.
14. Стерман Л. С. Исследование теплообмена при кипении жидкости в трубах//ЖТФ. 1954. Т. 24, № 11. С. 2046-2053.
15. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники: Пер. с польского/Под ред. П. Г. Романкова. Л.: Госхимиздат, 1961.