

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Приводятся результаты экспериментальных исследований кипения суспензии кристаллов сахара в межкристальном растворе в условиях свободного движения при пониженных давлениях.

Интенсивность теплоотдачи к кипящим суспензиям, состоящим из кристаллов сахара в межкристальном растворе (утфеля), подчиняется более сложным законам по сравнению с кипящими однокомпонентными жидкостями. Значение коэффициента теплоотдачи к утфелю значительно ниже по сравнению с сахарным раствором и растворителем (водой) и при прочих равных условиях зависит от содержания сухих веществ, интенсивности теплового потока, давления, теплофизических и режимных факторов. Низкое значение α_2 усугубляется тем, что утфели относятся к термолабильным суспензиям и процесс теплообмена в вакуум-кристаллизаторах ведется при пониженных давлениях и небольших q .

К. настоящему времени опубликовано значительное количество исследований по теплоотдаче и механизму парообразования для унарных и бинарных жидкостей и растворов органического и неорганического происхождения, однако эти данные не полностью отражают физическую картину при кипении суспензии и не позволяют определить α_2 при расчете вакуум-кристаллизаторов. С этой целью на экспериментальной установке [1, 2] получены данные в квазистационарных условиях при кипении стабильных и метастабильных утфелей с концентрацией $CB_v = 73,6\text{--}92,4\%$, $KP = 10\text{--}50\%$, $p = 5,2\text{--}68,4$ кПа, $q = 24\text{--}100$ кВт/м². Давление в каждом опыте поддерживалось постоянным, как и технологические параметры утфеля, а тепловой поток изменялся, что вело к изменению α_2 . При этом зависимость α_2 от q получена неоднозначно, что показывает на существование различных режимов теплообмена – конвективного, неразвитого и развитого пузырькового кипения. Так как α_2 при конвективном теплообмене и неразвитом пузырьковом кипении очень нестабильны, то нами определены границы начала развитого пузырькового кипения, которые показывают, что с увеличением количества кристаллов в утфеле момент начала развитого кипения затягивается, хотя утфель в пристенном слое достигает перегревов в несколько десятков градусов. Это объясняется увеличением эффективной вязкости, которая приводит к уменьшению подвижности массы утфеля. По мере увеличения содержания твердой фазы турбулизация пристенного слоя уменьшается, так как малые по размеру паровые пузырьки не могут преодолеть возросшее гидростатическое давление и диапазон их действия уменьшается.

*Приведенный на рис. 1 график дает возможность определить пределы регулирования теплового потока в период уваривания утфелей с оптимальным использованием энергоресурсов при определенном давлении в надутфельном пространстве аппарата и показывает, что более стабильная область тепло- и массообмена находится в области выше линии с определенным содержанием кристаллов сахара в утфеле. Знание зависимости начала развитого кипения позволяет выбрать режим работы вакуум-кристаллизаторов с постоянным коэффициентом теплоотдачи.

Этот фактор имеет важное значение в силу того, что в процессе уваривания утфелей количество испаряемой воды уменьшается, а эффективные коэффициенты вязкости и плотности возрастают, что приводит к значительному падению α_2 . Значения α_2 определялись по выражению

$$\alpha_2 = \frac{q}{T_{ct} + \Delta_{\phi x} + \Delta_{zo} - T_n}, \quad (1)$$

из которого видно, что при ведении процесса уваривания утфелей в вакуум-кристаллизаторах α_2 должно уменьшаться, так как при постоянном увеличении

концентрации CB возрастает физико-химическая депрессия, одновременно с этим происходит наваривание утфеля в аппарате и увеличение его плотности, что в свою очередь ведет к увеличению гидродинамической депрессии [3]. Таким образом, для того чтобы обеспечить повышение температуры стенки от $T_{ст}$ до $T_{ст} + \Sigma\Delta$, тепловой поток

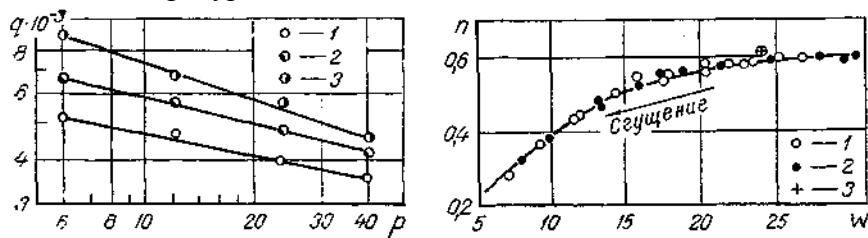


Рис. 1. Границы перехода к развитому пузырьковому кипению метастабильных утфелей $Pl=1,1$ с содержанием кристаллов сахара: 1—10%; 2—30%; 3—50%. q , Вт/м²; p , кПа

Рис. 2. Степень влияния интенсивности теплового потока на коэффициент теплоотдачи при кипении: 1 — метастабильных; 2 — стабильных утфелей; 3 — сахарных растворов с $CB = 80\%$. W , %

должен быть больше, чем для унарных жидкостей, т. е. в этом случае увеличение концентрации CB и слоя наваренного утфеля уменьшает α_2 .

Анализ уравнения (1) дает возможность изыскать пути интенсификации процессов тепло- и массообмена. Так, от составляющей $\Delta_{гд}$ можно избавиться, если вести процесс в тонком слое гравитационно-стекающего утфеля [4]. На природе возникновения физико-химической депрессии следует остановиться. При кипении утфелей вокруг парового пузырька образуется пограничный слой с повышенным содержанием CB , из которого в паровую фазу переходит практически только растворитель, поэтому вокруг пузырька образуется слой раствора с кристаллами сахара, обедненный растворителем. В пределах этого слоя концентрация CB изменяется от максимальной величины CB_{max} у поверхности раздела фаз до концентрации основной массы утфеля CB_y . Возникающие в неоднородном концентрационном поле градиенты химических потенциалов [5] вызывают встречные потоки компонентов раствора в направлении нормали к поверхности раздела фаз. В связи с тем что $CB_{max} > CB_y$, частицы растворителя движутся к поверхности раздела фаз, а частицы растворенного вещества в глубь раствора. Это движение переноса масс усугубляется наличием твердой фазы, которая имеет большую плотность, чем раствор, и под действием гравитационных сил стремится вниз аппарата, где в основном протекает процесс тепломассообмена. Наличие твердой фазы ухудшает доступ свежих (обогащенных растворителем) порций раствора к поверхности фазового раздела утфель — пар. В силу этого происходит повышение температуры насыщения в слое на величину, ориентировочно равной физико-химической депрессии.

Оказать влияние на межфазную концентрационную поверхность можно различными способами: путем вдувания пара в каждую кипяtilьную трубку вакуум-аппарата, механического усиления циркуляции, ультразвуковыми и механическими колебаниями, а также добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) в кипящий утфель. Гидродинамический метод усиления циркуляции позволяет использовать кинетическую энергию вдуваемого пара для разрушения межфазного концентрационного слоя, тем самым улучшая доступ свежих (обогащенных растворителем) порций раствора к растущему пузырьку, чем способствует улучшению тепломассообмена и увеличению α_2 [6]. Такой же результат можно получить добавлением ПАВ. Выполненные исследования [7, 8] позволили установить, что в процессе кристаллизации сахарозы с добавлением ПАВ наблюдается увеличение массовой скорости переноса вещества из раствора к поверхности кристаллов и сокращается длительность уваривания утфеля одной кристаллизации на 18—20 мин.

Для утфелей с различным содержанием CB и KP можно выделить режим развитого пузырькового кипения, когда интенсивность теплообмена достигает своего максимального значения. Для такого режима связь интенсивности теплоотдачи с тепловым потоком описывается степенной функцией

$$\alpha_2 = Aq^n. \quad (2)$$

Здесь коэффициент пропорциональности и значение показателя степени при q зависят от давления в надутфельном пространстве и теплофизических параметров исследуемого утфеля.

В связи с ухудшением теплообмена при увеличении содержания CB_y целесообразно представить экспериментальную кривую зависимости показателя степени n при q от содержания растворителя в утфеле (рис. 2). Эта зависимость наглядно показывает, что при уваривании кристаллизующихся суспензий органического происхождения необходимо выбирать оптимальные режимные параметры ведения процесса, при которых достигается соответствие интенсивности испарения растворителя и фазового превращения при кристаллизации.

Проведенные визуальные наблюдения с их последующим анализом показали, что при давлениях менее 30 кПа в процессе кипения наблюдаются качественные изменения, отмеченные в [9]. Увеличение критического размера парового зародыша вследствие уменьшения плотности пара, высокая адгезионная способность межкристального раствора и высокая эффективная вязкость утфеля приводят к существенным трудностям в процессе генерации паровой фазы, к значительным паузам в процессе парообразования и перегревам теплоотдающей поверхности. При этом зарождение пузырька происходит только после общего перегрева массы утфеля [10]. Все это ведет к значительной нерегулярности процесса теплообмена, чем вызвано снижение α_2 . Паровые пузырьки образуются в различных местах поверхности без явно выраженных центров парообразования. Отрывные размеры пузырьков трудно определить даже при низких интенсивностях q , когда возникают одиночные пузырьки. При высоких q пузырьки зачастую теряют шаровидную форму и в момент отрыва приобретают вид эллипсоида, вытянутого по горизонтали, иные пузырьки дробятся на более мелкие, соединяются с соседними, образуя бесформенные паровые конгломераты. Такую картину можно было наблюдать в утфелях с содержанием $KP = 10\%$ и выше.

Интенсифицировать процесс тепломассообмена в этих условиях возможно всеми ранее отмеченными способами, а также путем ведения процесса на пористых пластинах с частичным проникновением пара через пористое тело. Это позволит увеличить число действующих центров парообразования и избежать инкрустации сахара в процессе кристаллообразования.

Обозначения

A – числовой коэффициент; KP – массовое содержание кристаллической фазы; Π – пересыщение межкристального раствора; CB_y – массовая концентрация сухих веществ в суспензии (утфеле); T_n – температура насыщения суспензии, определяемая по давлению над ее поверхностью, К; T_c – температура теплоотдающей стенки, К; q – плотность теплового потока, Вт/м²; n – показатель степени; p – давление, кПа; W – массовое содержание растворителя в суспензии; α_2 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); Δ_{20} – гидродинамическая депрессия, К; $\Delta_{фх}$ – физико-химическая депрессия, К.

Nomenclature

A , numerical coefficient; KP , mass content of the crystalline phase; Π , supersaturation of the intercrystal solution; CB_y , mass concentration of dry substances in a suspension (massecuite); T_n , suspension saturation temperature determined by the pressure over its surface, К; T_{cm} , temperature of a heat transfer wall, К; q , heat flux density, W/m²; n , exponent; p , pressure, kPa; W , mass content of the suspension solvent; α_2 heat transfer coefficient, W/(m²·К); $\Delta_{гд}$, hydrodynamic depression, К; $\Delta_{фх}$, physicochemical depression, К.

Figure Captions

Fig. 1. Boundaries of transition to a developed bubble boiling of metastablei.masseccutes with sugar crystal content 1—10%; 2—30%; 3—50%.

Fig. 2. Degree of the effect of the heat flux intensity on the heat transfer coefficient with boiling: 1, metastable; 2, stable masseccutes; 3, sugar solutions with dry substances equal 80%.

Summary

Experimental observation of boiling sugar crystal suspension in the intercrystal solution under free motion at reduced pressure are given.

Литература

1. **Гаряжа В. Т., Кулинченко В. Р.** Исследование механизма теплообмена при кипении воды и сахарных растворов— Теплофизика и теплотехника, 1973, № 24, с. 132–135.
2. **Кулинченко В. Р., Гаряжа В. Т.** Експериментальне допдження паростворення в киплячих цукрових розчинах і утфелях— Харчова промисловкть. К.: Технка, 1973, № 1, с. 143–148.
3. **Попов В. Д.** Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахара— М.: Пищевая промышленность, 1973— 320 с.
4. **Дидушко Б. Г., Гаряжа В. Т., Кулинченко В. Р.** Влияние удельного теплового потока на интенсивность теплообмена при кипении гравитационного стекающего слоя утфеля/Реферативная информация о законченных НИР в вузах УССР — Пищевая промышленность, 1978, № 13, с. 11–12.
5. **Стюшин И. Г., Астафьев В. И.** К вопросу о теплообмене при кипении растворов— Теоретические основы химической технологии, 1975, т. 9, № 4, с. 555–562.
6. **Гаряжа В. Т., Артюхов Ю. Г., Кулинченко В. Р.** Вакуум-испаритель с усиленной циркуляцией.— Химическое и нефтяное машиностроение, 1976, № 4, с. 3–4.
7. **Кот Ю. Д., Белостоцкий Л. Г., Сущенко А. К.** Интенсификация процессов кристаллизации сахарозы— Сахарная промышленность, 1977, № 5, с. 29–33.
8. **Кухар Н. С., Пустоход А. П., Ропотенко Я. Г.** Опыт применения поверхностноактивных веществ при уваривании утфелей на сахарных заводах— Сахарная промышленность, 1978, № 4, с. 22–23.
9. **Ягов В. В., Городов А. К., Лабунцов Д. А.** Экспериментальное исследование теплообмена при кипении жидкостей при пониженных давлениях в условиях свободного движения—ИФЖ, 1970, т. 18, № 4, с. 624–630.
10. **Лабунцов Д. А., Ягов В. В., Городов А. К.** Экспериментальное определение температурного напора начала кипения воды и этанола в области низких давлений.— Кипение и конденсация, 1977, в. 1, с. 16–23.

СУПРОВІДНА ІНФОРМАЦІЯ ДО ПУБЛІКАЦІЇ
ИФЖ, июль, том XLV, № 1.— Минск: 1983.— С. 96–99

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ КИПІННІ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ RESEARCH OF HEAT EXCHANGE AT BOILING OF TERMOLABILING SUSPENSIOIDS

**В. Р. Кулінченко, В. Т. Гаряжа, Б. Г. Дідушко
В. Р. Кулинченко, В. Т. Гаряжа, Б. Г. Дидушко
V.R. Kulintchenko, V.T. Garyazha, B.G. Didushko**

Наводяться результати експериментальних досліджень кипіння суспензії кристалів цукру в міжкристальному розчині в умовах вільного руху при пониженнях тисків.

Ключові слова: Кипіння, суспензія, тиск, тепловіддача.

Приводятся результаты экспериментальных исследований кипения суспензии кристаллов сахара в межкристальном растворе в условиях свободного движения при понижениях давлений.

Ключевые слова: Кипение, суспензия, давление, теплоотдача.

Results over of experimenting researches of boiling of suspensoids of crystals of sugar are brought in interpure solution in the conditions of free motion at falling pressures.

Keywords: Boiling, suspensoids, pressure, heat emission.