

критической длины возмущающей волны. Т.е. длинноволновые возмущения являются более опасными с точки зрения потери устойчивости при больших числах Рейнольдса.

Исследования устойчивости при  $s = 1$  показали, что в этом случае течение абсолютно устойчиво, что, конечно же, не соответствует реальной физической картине. Для случая  $s = 1$  профиль (14) при  $Re_\tau = 0$  на большей части толщины парового слоя близок к линейному, а при росте  $Re$  линейность профиля возрастает. При  $Re_\tau = 10$  профиль практически линейный и, следовательно, в соответствии со второй теоремой Релея об устойчивости движения потока [5] такой поток устойчив. Аналогичная ситуация возникает при исследовании устойчивости течения Куэтта методом линейных возмущений [5], когда метод линейных возмущений также показывает абсолютную устойчивость потока. Таким образом, для исследования данного вида течения на устойчивость следует опираться на нелинейный энергетический подход [6], базирующийся на построении функционалов энергии.

### 9. Выводы

В работе получены системы уравнений в двумерном и трехмерном приближении для возмущающих амплитуд, позволяющие определять

критерии устойчивости парового слоя при пленочном кипении. На основе решения задачи на собственные значения методом коллокаций показано, что вид функции  $Ar_{cr} = Ar_{cr}(Re_b)$  носит экстремальный характер (с максимумом и минимумом). Это обусловлено влиянием двух факторов: увеличением пологости формы профиля скорости невозмущенного течения и величиной числа Рейнольдса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 296 с.
2. Bromley L.A. Heat transfer in stable film boiling // Chemical Eng. Prog. — 1950. — 46. — P. 221 — 227.
3. Кох Дж.К.В. Анализ пленочного кипения на вертикальных поверхностях // Теплопередача. — 1962. — 84. — С. 70 — 78.
4. Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 416 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974. — 712 с.
6. Джозеф Д. Устойчивость движения жидкости. — М.: Мир, 1981. — 638 с.

Получено 09.09.2008 г.

УДК 542.97:62.225

Корчинский А.А.,  
Ободович А.Н., Матюшкин М.В.

Институт технической теплофизики НАН Украины

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПОСРЕДСТВОМ МЕТОДА ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВВОДА ЭНЕРГИИ

Описано експериментальні дослідження процесу інвертування білого цукрового сиропу за допомогою струмінного апарату конструкції Інституту

Описаны экспериментальные исследования процесса инвертирования белого сахарного сиропа посредством струйного аппарата конструкции Инсти-

We describe our experimental study the process of inverting of white sugar syrup by means of a jet device of the design of the Institute of Engineering

технічної теплофізики. Наведено результати апробації струминного апарата у промислових умовах.

тута технической теплофізики. Представлены результаты апробации струйного аппарата в промышленных условиях.

Thermophysics. We also give the results of the jet device tests under industrial conditions.

$P$  – давление;  
 $R$  – радиус пузырька;

$W_R$  – скорость;  
 $\tau$  – время.

Известно, что в химических, пищевых и т.п. технологиях для интенсификации химических реакций широко применяются катализаторы. Влияние катализаторов может быть весьма сильным, и под их действием скорости реакций могут изменяться на несколько порядков.

Порядок взаимодействия молекул при катализе включает в себя сначала доставку молекулы катализатора к молекуле реагента на расстояние действия ван-дер-ваальсовских сил, а затем собственно взаимодействие молекул катализатора и реагента на химическом уровне. Скорость доставки молекулы катализатора к молекуле реагента определяет скорость каталитической реакции.

Одним из частных случаев гомогенного катализа в растворах является реакция под действием водородных ионов. Так, например, при инверсии сахарозы в присутствии лимонной кислоты реакция ускоряется действием водородных ионов.

Для производства фруктовых вод по существующей технологии инверсию сахарозы проводят 25-и процентным раствором лимонной кислоты из расчёта 100 г на 100 кг сахара при температуре 95...100 °С в течение 1,5...2 ч при постоянном механическом перемешивании. При этом получают не более 50...55 % инвертного сахара, так как дальнейшая его инверсия приводит к избыточному по нормам здравоохранения образованию вредных побочных продуктов. При более глубоком кислотном гидролизе наряду с инвертным сахаром образуется токсичный продукт глубокого распада сахарозы – оксиметилфурфурол (ОМФ). Содержание ОМФ в напитках не должно превышать 100 мг на 1 л напитка.

В Институте технической теплофизики (ИТТФ) НАН Украины разработан способ дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ), который базируется на динамическом воздействии на дисперсную фазу интенсивно растущих или сжимающихся пузырьков, возникающих в гетерогенном жидкостном потоке в результате созда-

ния в нём активного гидродинамического режима, характеризующегося периодическим чередованием в потоке зоны разрежения и зоны скачкообразного повышения давления.

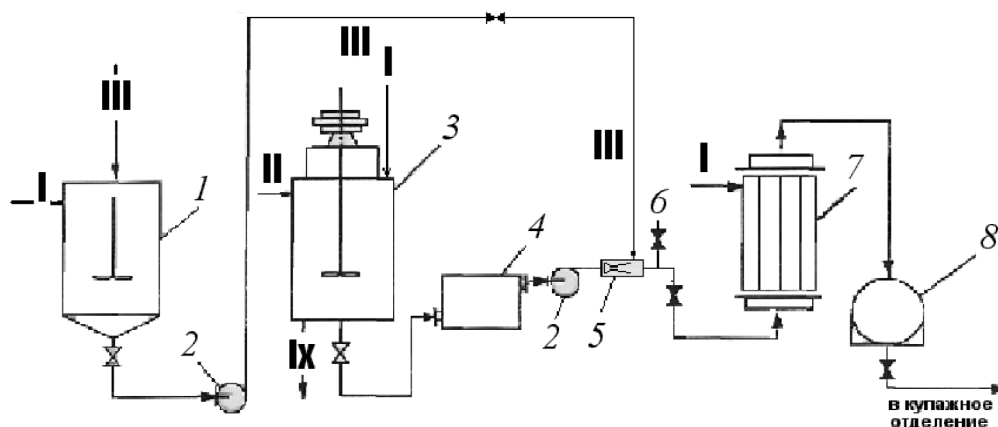
Этот способ был реализован с помощью разработанного в ИТТФ НАН Украины струйного аппарата и успешно применён для интенсификации каталитической реакции инверсии сахарозы для пищевой промышленности.

Эксперименты по инвертированию белого сахарного сиропа кислотным способом в промышленных условиях были проведены на оборудовании предприятия ООО “Эйбл ЛТД Ко”. В стандартную технологическую схему по инвертированию сахарозы, изображённую на рис. 1, включался струйный аппарат.

Технология приготовления инвертного сахарного сиропа состоит в следующем.

В ёмкость 3 объёмом 1 м<sup>3</sup> загружается кристаллическая сахароза и вода в соотношении 6,6 к 3,4. При помощи нагревателя раствор сахарозы доводится до температуры кипения и кипятится в течение 30 мин в соответствии с нормами приготовления сахарного сиропа, при этом в ёмкости 3 работает механическая мешалка мощностью 4,5 кВт. Параллельно в ёмкость 1 объёмом 0,04 м<sup>3</sup> загружаются кристаллическая лимонная кислота и вода и готовится 25 %-ный раствор лимонной кислоты также при постоянном механическом перемешивании. Далее инверсию белого сахарного сиропа проводили двумя способами.

В соответствии с первым способом после кипячения и охлаждения белого сахарного сиропа до 80...90 °С в ёмкость 3 из ёмкости 1 подаётся раствор лимонной кислоты из расчёта 1 г лимонной кислоты на каждый кг сахара. После чего смесь сахарного сиропа и лимонной кислоты посредством насоса 2, продуктивностью 20 м<sup>3</sup>/ч и давлением 0,4 МПа, подаётся в струйный аппарат 5, из которого возвращается в ёмкость 1. Далее в случае необходимости цикл перекачки повторяется.



**Рис. 1. Аппаратурно-технологическая схема приготовления инвертных сахарных сиропов по предлагаемой технологии. 1 – аппарат для приготовления раствора лимонной кислоты; 2 – насосы; 3 – сироповарочный аппарат; 4 – фильтр-ловушка; 5 – струйный аппарат; 6 – пробоотборник; 7 – теплообменник; 8 – сборник.**

***I – вода; IX – конденсат; II – пар; III – раствор лимонной кислоты.***

В соответствии со вторым способом после кипячения и охлаждения до 80...90 °С белый сахарный сироп посредством насоса 2 подаётся в струйный аппарат, в который синхронно из ёмкости 1 подаётся раствор лимонной кислоты. Из струйного аппарата инвертный сахарный сироп подаётся в теплообменник 7 и далее в сборник 8.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. После приготовления белого сахарного сиропа в ёмкости 3 в соответствии с первым способом раствор лимонной кислоты подавался также в ёмкость 1 при непрерывной работе мешалки и затем пропускался через струйный аппарат. После определённого количества циклов пропускания из ёмкости 3 отбиралась проба инвертного сиропа и по стандартной методике определялось количество инвертного сахара в растворе и количество вредной примеси оксиметилфурфура. Данные по результатам эксперимента сведены в табл. 1, из которой видно, что инверсия сахарозы идёт более интенсивно при более высокой температуре. Кроме того, более длительная обработка на струйном аппарате определяла в инвертном сиропе большее количество вредного вещества – оксиметилфурфура.

Исходя из предположения, что инверсия сахарозы очень интенсивно проходит непосредственно в самом струйном аппарате, было решено исследовать процесс инвертирования белого

сахарного сиропа при непосредственной подаче раствора лимонной кислоты в струйный аппарат. Результаты экспериментов сведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, лимонную кислоту на струйном аппарате можно экономить на 30 %. Инверсия сахарозы проходит на 100 % при соотношении кислоты к сахарозе – 0,7 г на 1 кг вместо 1 г на 1 кг при использовании традиционной технологии инвертирования. В полученном глюкозно-фруктозном сиропе исключается наличие оксиметилфурфура при инвертировании при 80 °С.

Возможность снижения количества лимонной кислоты может быть объяснена, с одной стороны, повышением кислотности (снижением pH) газожидкостного потока при возникновении кавитационных пузырьков, которые, как известно, можно рассматривать как плоскопараллельные конденсаторы с разноимённо заряженными пластинами, так как на одной границе пузырька преобладают ионы одного знака, а на другой – противоположного. При этом в кавитационном пузырьке под действием напряжённости создавшегося электрического поля возникают богатые энергией частицы – ионизированные возбуждённые молекулы и ионы, свободные радикалы и пр. То есть молекулы воды расщепляются на валентно-насыщенные ионы водорода  $H^+$  и гидроксильные радикалы  $OH^-$ , обладающие большой реакционной способностью.

Табл. 1. Зависимость степени инвертирования белого сахарного сиропа от температуры и продолжительности инверсии

| Температура инверсии, °С | Продолжительность инверсии, мин | Количество циклов | Массовая доля инвертного сахара, % СВ | Массовая доля ОМФ, мг/1000г |
|--------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 80                       | 1                               | 2                 | 60,2                                  | 60,7                        |
|                          | 3                               | 6                 | 70,4                                  | 65,2                        |
|                          | 5                               | 10                | 73,7                                  | 73,5                        |
|                          | 10                              | 20                | 87,9                                  | 79,1                        |
|                          | 15                              | 30                | 100                                   | 82,1                        |
| 85                       | 1                               | 2                 | 65,4                                  | 64,1                        |
|                          | 3                               | 6                 | 74,3                                  | 70,3                        |
|                          | 5                               | 10                | 89,7                                  | 78,4                        |
|                          | 10                              | 20                | 95,4                                  | 89,6                        |
|                          | 15                              | 30                | 100                                   | 98,7                        |
| 90                       | 1                               | 2                 | 79,8                                  | 73,5                        |
|                          | 2                               | 4                 | 100                                   | 82,1                        |
|                          | 3                               | 6                 | 100                                   | 82,1                        |

Табл. 2. Зависимость степени инвертирования белого сахарного сиропа в струйном аппарате от удельного количества лимонной кислоты, продолжительности и температуры инверсии

| Количество лимонной кислоты, г/(кг сахарозы) | Температура инверсии, °С | Массовая доля инвертного сахара, % СВ | Массовая доля ОМФ, мг/1000г |
|----------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1                                            | 80                       | 100                                   | 0                           |
|                                              | 85                       | 100                                   | 10,5                        |
|                                              | 90                       | 100                                   | 58,6                        |
| 0,9                                          | 80                       | 100                                   | 0                           |
|                                              | 85                       | 100                                   | 8,2                         |
|                                              | 90                       | 100                                   | 46,7                        |
| 0,8                                          | 80                       | 100                                   | 0                           |
|                                              | 85                       | 100                                   | 6,3                         |
|                                              | 90                       | 100                                   | 34,6                        |
| 0,7                                          | 80                       | 100                                   | 0                           |
|                                              | 85                       | 100                                   | 4,5                         |
|                                              | 90                       | 100                                   | 29,3                        |
| 0,6                                          | 80                       | 78,2                                  | 0                           |
|                                              | 85                       | 87,8                                  | 3,3                         |
|                                              | 90                       | 96,3                                  | 21,1                        |
| 0                                            | 80                       | 20                                    | 0                           |
|                                              | 85                       | 27,7                                  | 2,3                         |
|                                              | 90                       | 38,2                                  | 11,2                        |

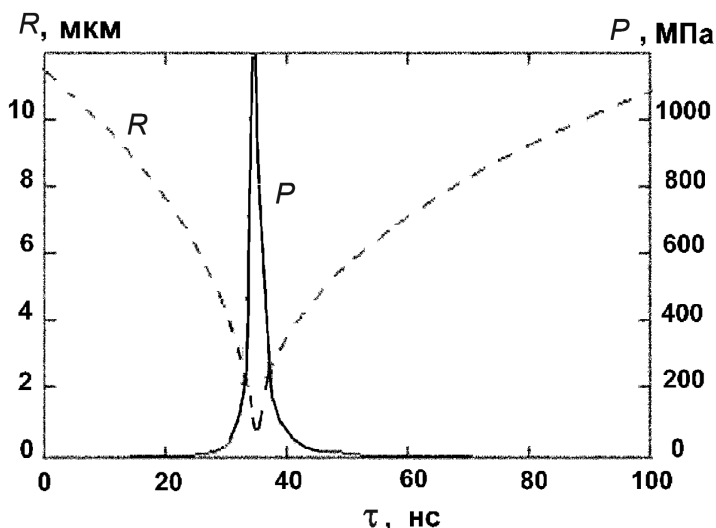


Рис. 2. Зависимость давления внутри кавитационного пузырька от его радиуса во времени.

Увеличение вследствие этого количества ионов  $H^+$  влияет на повышение кислотности среды. Ввиду того, что продолжительность жизни кавитационной полости ( $0,5 \cdot 10^{-6}$  с) меньше времени существования свободных радикалов  $H^+$  и  $OH^-$  ( $10^{-2} \dots 10^{-4}$  с), в результате захлопывания кавитационных полостей указанные радикалы остаются в жидкости и участвуют в процессе гидролиза сахарозы.

С другой стороны, снижение количества лимонной кислоты и общая интенсификация процесса инверсии сахарозы как каталитического процесса может быть объяснено следующим.

Порядок взаимодействия молекул при катализе включает в себя сначала доставку молекулы катализатора к молекуле реагента на расстояние действия ван-дер-ваальсовских сил (около 1 нм), а затем собственно взаимодействие молекул катализатора и реагента на химическом уровне. При этом каталитическое взаимодействие блокируется процессом диффузии реагента через слой прореагировавшего продукта. Это обстоятельство определяет скорость каталитической реакции [1, 2].

Применение метода ДИВЭ при каталитических реакциях обуславливает возникновение в смеси катализатор – реагент кавитационных пузырьков, при схлопывании которых образуются кумулятивные струйки и ударные волны, интенсивно разрушающие слой прореагировавшего продукта и существенно повышающие частоту

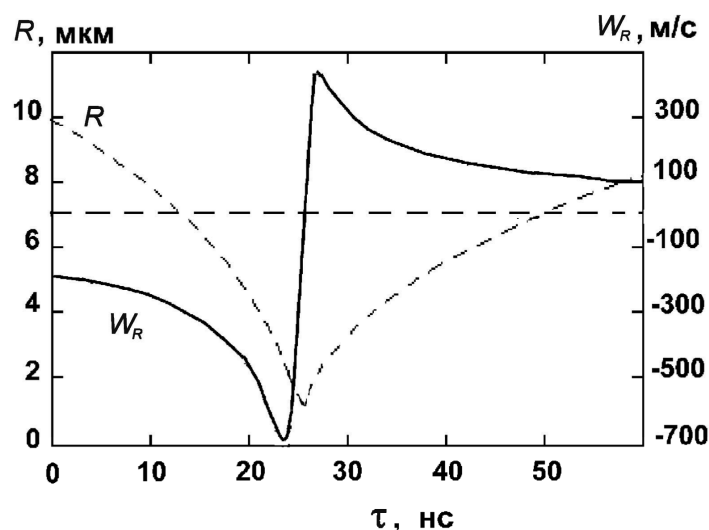


Рис. 3. Зависимость скорости жидкости на границе кавитационного пузырька от его радиуса во времени.

соприкосновения молекул катализатора и реагента на расстоянии действия ван-дер-ваальсовских сил. Иллюстрацией к сказанному могут служить зависимости скорости жидкости на границе и давления внутри кавитационного пузырька в процессе его схлопывания. Как видно из рис. 2,3, в течение наносекунд скорость жидкости на границе кавитационного пузырька меняется от 500 до  $-700$  м/с, а давление может превышать 1000 МПа. Как указывают [3,4], при таком режиме схлопывания кавитационного пузырька толщины образующихся кумулятивных струек составляют около 7 % от максимального размера пузырька и лежат в области единиц – десятков микрометра.

### Выводы

В результате выполненной работы установлено, что при использовании струйного аппарата ДИВЭ для инвертирования сахарозы по сравнению с существующей технологией:

1. Продуктивность получения инвертного сиропа возрастает в 20 раз и составляет  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ .
2. Количество трансформируемой на наноуровне сахарозы возрастает до 100%.
3. Наличие в полученном инвертном сиропе вредной примеси – оксиметилфурфуrolа исключается.

4. Расход сахарозы уменьшается на 2,63 %.
5. Расход лимонной кислоты снижается на 30 %.
6. Исключаются энергозатраты на перемешивание белого сахарного сиропа при инвертировании, что приводит к удешевлению готового продукта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаммет Л.П.* Основы физической органической химии. — М.: Мир, 1972. — 534 с.

2. *Куреев В.А.* Краткий курс физической химии. — М.: Химия, 1978. — 620 с.
3. *Plesset M.S., Chapman R.B.* Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighbourhood of solid boundary // *J.Fluid Mech.* — 1971. — Vol.47, №2. — P.283—290.
4. *Tomita Y., Shima A.* Mechanism of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse // *J.Fluid Mech.* — 1986. — Vol.169. — P.535—564.

Получено 25.09.2008 г.

УДК 536.24

ГОРОБЕЦ В.Г.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ РЕБЕР РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ НАЛИЧИИ ПОКРЫТИЯ НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Досліджено вплив покриттів (відкладень) на теплові характеристики і оптимальні розміри оребрених поверхонь різного типу (повздожніх і кільцевих ребер, шипів). Знайдено розв'язок задачі теплопереносу для ребер з покриттям у спрощеній і двовимірній постановках. Отримано аналітичні розв'язки для температурних розподілів та теплової ефективності композитних ребер. Проведено порівняння спрощених і двовимірних розв'язків задач теплопереносу для ребер з покриттями. Показано, що оптимальні розміри ребер з покриттям залежать від числа Біо покриття і можуть значно відрізнятися від оптимальних розмірів "чистих" ребер. Визначено вклад торцевої поверхні для ребер з покриттям у сумарну їх тепловіддачу. Визначено умови "вигідності" оребрення для композитних ребер. Вивчено вплив нерівномірності забруднюючих відкладень на тепловіддачу та оптимальні розміри повздожніх ребер. Визначено поправочні коефіцієнти, які враховують цей вплив.

Исследовано влияние покрытий (отложений) на тепловые характеристики и оптимальные размеры оребренных поверхностей различного типа (продольных и кольцевых ребер, шипов). Найдено решение задачи теплопереноса для ребер с покрытием в упрощенной и двумерной постановках. Получены аналитические решения для температурных распределений и тепловой эффективности составных ребер. Показано, что оптимальные размеры ребер с покрытием зависят от числа Био покрытия и могут значительно отличаться от оптимальных размеров "чистых" ребер. Определен вклад торцевой поверхности для ребер с покрытием в суммарную их теплоотдачу. Найдены условия "выгодности" оребрения для композитных ребер. Изучено влияние неравномерности загрязняющих отложений на теплоотдачу и оптимальные размеры продольных ребер. Определены поправочные коэффициенты, которые учитывают это влияние. Проведено сравнение упрощенных и двумерных решений задач теплопереноса для ребер с покрытиями.

The influence of coatings on thermal characteristics of the fins of various shapes (longitudinal and circular fins, cylindrical pins) has been investigated. Heat transfer in a simplified and two-dimensional statement of the problem is considered, and the analytic solutions for the temperature distributions and thermal efficiency of the fins with coatings are found. Comparison of the simplified and two dimensional solutions for composite fins are carried out, and the errors which can be appeared in a simplified heat transfer model are obtained. The contribution of the top surface in a total heat flux leaded by a composite fin is determined. The condition of the «advantage» for a composite fin is found. The optimum sizes of the longitudinal fins with uniform and non-uniform coating are defined. It is shown that the optimum sizes of the fins with polluting or protective coating depend on the Bio number of coating and can considerably differ from the optimum sizes of «clean» fins. The influence of nonuniform polluting on thermal efficiency and optimum sizes of the longitudinal fins is studied. The correction factors for fin efficiency and optimum fin sizes which take into account the non-uniformity of polluting have been calculated.