

О МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В САХАРНЫХ РАСТВОРАХ

Д. Е. СИНАТ-РАДЧЕНКО,
В. Д. ПОПОВ

(Киевский технологический институт
пищевой промышленности)

Скорость кристаллизации утфелей последних продуктов в сахарном и рафинадном производстве пропорциональна скорости охлаждения утфеля.

Коэффициент теплоотдачи от утфеля к поверхности теплообмена α_1 при охлаждении утфеля в промышленных мешалках-кристаллизаторах почти в сто раз меньше коэффициента теплоотдачи к воде α_2 ($\alpha_1 = 30 \div 90 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$; $\alpha_2 = 1000 \div 6000 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$), что обуславливает малые коэффициенты теплопередачи K и длительность процесса.

Одним из средств интенсификации теплообмена в высоковязких средах являются колебания поверхности теплообмена с низкой (до 50 гц) частотой и амплитудой до нескольких сантиметров, которые воздействуют на пограничный слой среды, уменьшая его термическое сопротивление.

Ребиндер и Михайлов [10] указывают, что применение вибраций позволяет интенсифицировать работу оборудования и создать новую технологию в давно известных процессах. Примеры этому можно найти в работе [8].

В нашей стране и за рубежом выпускаются аппараты для эмульгирования взвесей, экстракции, химических реакций и т. д. емкостью от 3 до 5000 л с виброперемешивающими устройствами.

Большинство исследователей изучали влияние на теплообмен колебаний среды (воздух, вода, масло, нефть) и получили интенсификацию процесса до трех раз.

Ряд авторов провели исследование влияния колебаний поверхности теплообмена на теплоотдачу в условиях есте-

ственной конвекции и в условиях вынужденного движения жидкостей [4, 5]. В качестве рабочей среды в основном использовался воздух, реже — вода. Значительный интерес представляет работа [3] по виброподогреву вязких нефтепродуктов. Кинематическая вязкость высоковязкого мазута М-100 ($\nu_{20} = 6,62 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сек}$), с которым работали Н. В. Калашников и В. И. Черников, имеет тот же порядок, что и вязкость паток сахарного производства ($\nu_{20} \approx 35 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сек}$). Для горизонтального цилиндра диаметром $d = 19$ и длиной $l = 635 \text{ мм}$ при отсутствии колебаний α к мазуту М-100 был в пределах $47\text{—}52 \text{ вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$ при средней разности температур между стенкой цилиндра и мазутом $\Delta t_{\text{ср}} = 42 \text{ град}$. При вибрации цилиндра с двойной амплитудой $2A = 30 \text{ мм}$ и частотой $f = 20 \text{ гц}$ коэффициент теплоотдачи возрос до $1050 \text{ вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$, т. е. в 20 раз.

Авторы указывают, что с увеличением вязкости α становится функцией только скорости вибрации и не зависит от сочетания A и f .

Цель данного исследования — изучить влияние низкочастотных механических колебаний теплообменной поверхности на интенсивность теплообмена в высоковязких и кристаллизующих продуктах сахарного производства при охлаждении, нагревании и дополнительном перемешивании.

Исходя из анализа известных теоретических и опытных данных, была спроектирована опытная установка (рис. 1), включающая в себя вибратор, элемент теплообмена, термостат с мешалкой.

Вибратор состоял из универсального коллекторного двигателя мощностью 400 вт с редуктором, расположенным в том же корпусе. Двигатель подключался к сети переменного тока через стабилизатор напряжения и автотрансформатор, с помощью которого плавно регулировалась от 0 до $3000 \text{ к}/\text{мин}$ частота колебаний, измеряемая электрическим дистанционным двухстрелочным тахометром типа ТЭ-45.

Конечный вал редуктора являлся эксцентриком с регулируемым эксцентриситетом в 1, 2, 3, 4, 5, 6 мм и позволял получать размах синусоидальных возвратно-поступательных колебаний ползуна до 12 мм. Параметры колебаний контролировались ручным вибрографом ВР-1.

Измерение затрачиваемой на колебания мощности велось с помощью ваттметра (класса 0,2), вольтметра и амперметра.

Элемент поверхности теплообмена 1, внутри которого циркулирует поступающая из термостата 5 типа ТС-15 вода, крепится к ползуну вибратора и колеблется в вертикальной плоскости. Количество прошедшей через элемент воды регулируется специальным игольчатым вентилем и измеряется ротаметром 8

Термостат 2, в котором устанавливаются сменные стаканы 3 с сахарным раствором, служит для поддержания

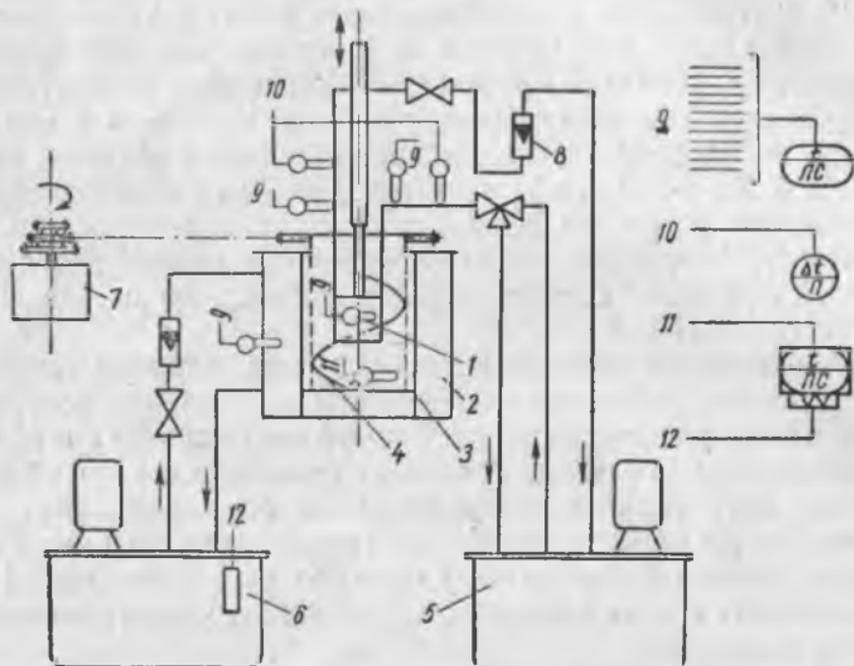


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

постоянной температуры раствора или изменения ее по определенному закону. Перемешивание раствора в стакане и взмучивание оседающих кристаллов сахара производится специальной винтовой мешалкой 4 с плавно регулируемым числом оборотов в минуту от 0 до 50. Привод мешалки осуществляется от коллекторного двигателя через редуктор 7 и цепную передачу со сменными звездочками. Вода в термостат установки поступает из термостата 6 типа ТС-15 снабженного дополнительными нагревателями.

Нагреватели 12 термостата 6 включаются регулирующим потенциометром 11 типа ЭПП-09, к которому подключается одна из термопар, находящихся в сахарном растворе.

Поверхности теплообмена в utfельных кристаллизаторах чаще всего бывают в виде змеевиков или дисков. Поэтому основное внимание уделялось змеевиковым, дисковым и пластинчатым (квадратным) элементам теплообмена. Изготовлено около двух десятков элементов разной формы и размера. Схема одного из них дана на рис. 2.

Змеевиковые элементы выполнены с витками, расположенными примерно в плоскости колебаний или перпендикулярно к ней. Наружные диаметры медных трубок 3, 6, 12 мм

Дисковые и пластинчатые элементы изготовлены из латуни с вертикальными или горизонтальными пластинами. Для наблюдения взаимного влияния пластин изготовлены сдвоенные и строенные элементы.

Наружные поверхности элементов теплообмена различных типов от 150 до 400 см², масса — от 150 до 750 г.

На каждом элементе размещены термодары, позволяющие измерять как температуру поверхности элемента и температуру воды на входе и выходе, так и температуру в интересующих нас точках на расстоянии от поверхности теплообмена.

Кроме того, сделаны щупы с термодарами для фиксирования температурного поля среды сверху, снизу и сбоку от элемента.

Медь-константановые термодары элементов и щупов присоединяются по схеме с общим холодным спаем к 12-точечному автоматическому самопишущему потенциометру 9 (см. рис. 1) типа ЭПП-09 с помощью штепсельных разъемов. Смена элементов занимает время порядка 1 мин, что позволяет их испытывать последовательно один за другим в сходных условиях. Наблюдение за изменением температуры проходящей через элемент воды осуществляется с помощью микроампермилливольтметра 10 типа М-95, к которому подключена дифференциальная термодара.

Следует отметить, что авторы известных работ занимались лишь виброподогревом различных продуктов. Опыты в основном проводились на цилиндрических нагревателях с прямым или косвенным электронагревом поверхности.

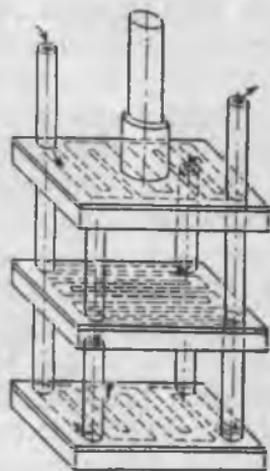


Рис. 2. Схема строенного пластинчатого элемента теплообмена с горизонтальными пластинами.

В этом случае количество тепла, передаваемое в окружающую среду, определяется по мощности тока. Температура в разных точках на поверхности цилиндра неодинакова. Приходится производить не совсем закономерную операцию ее осреднения.

Изготовить змеевиковые, дисковые или пластинчатые элементы теплообмена с электрообогревом сложно, еще сложнее осреднить температуру их поверхности. При тесной взаимосвязи процессов тепло- и массообмена (количество выкристаллизовавшегося сахара пропорционально количеству отведенного от утфеля тепла) нельзя заменить изучение теплообмена при охлаждении изучением теплоотдачи при нагревании.

Для приближения экспериментов к производственным условиям использовали в качестве теплоносителя воду, получив возможность изучить влияние одновременного изменения α_1 и α_2 в нужных пределах.

В качестве определяющего размера был принят для змеевиковых элементов теплообмена наружный диаметр трубки, для дисковых — диаметр диска, для пластинчатых — сторона квадрата. За определяющую температуру принята температура среды t_f после ее перемешивания, которая для изучаемых растворов поддерживалась постоянной в условиях опыта. Поддерживалась постоянной и температура воды на входе в элемент $t_{вн}$.

Расчеты коэффициента теплопередачи k велись по методике общей для расчета теплообменников [7]. Приняв с некоторым приближением k постоянным по поверхности теплообмена F и считая, что разность температур между изучаемым раствором и водой меняется по экспоненциальному закону, из уравнений теплового баланса и теплообмена получаем

$$k = \frac{W}{F} \ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t_m} = \frac{1}{\frac{F}{\alpha_1 F_1} + \sum_1 \frac{\delta}{\lambda} + \frac{F}{\alpha_2 F_2}},$$

где W — водяной эквивалент теплоносителя, *вт/град*; $\Delta t_0 = t_f - t_{вн}$ для охлаждения и $\Delta t_0 = t_{вн} - t_f$ для нагрева; $\Delta t_m = t_f - t_{вк}$ для охлаждения и $\Delta t_m = t_{вк} - t_f$ для нагрева; $\sum \frac{\delta}{\lambda}$ — сумма термических сопротивлений стенки с учетом возможных загрязнений, *м²град/вт*; F — поверх-

ность теплоотдачи стенки элемента, считая по середине ее толщины, m^2 ; F_1, F_2 — поверхности теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителя.

Для змеевиков средняя поверхность теплоотдачи F определялась как для цилиндрической стенки. Для других элементов теплообмена произвольной формы по аналогии со средней поверхностью для шаровой стенки, выраженной через ее наружную F_1 внутреннюю F_2 поверхности, считаем

$$F = \frac{F_1 + F_2}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{F_1 \cdot F_2}$$

При $\frac{F_2}{F_1} \geq 0,5$ можно полагать $F = \frac{F_1 + F_2}{2}$. При этом погрешность в вычислении не превышает 3%.

Трудность состоит в выделении α_1 и α_2 из k . Известно, что колебания поверхности теплообмена содействуют росту α_1 , но в литературе нет данных о их влиянии на α_2 . По полученным предварительным данным колебания водонаполненного элемента теплообмена не оказывают существенного влияния на гидравлическое сопротивление воде, протекающей внутри элемента (что фиксировалось по показаниям ротаметра) и на коэффициент теплоотдачи от стенки элемента к воде α_2 . Изменение интенсивности колебаний влияет на α_2 за счет изменения температуры стенки $t_{ст}$ элемента, что учитывается отношением

$$\left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

где Pr — критерий Прандтля при средней температуре воды, проходящей через элемент; $Pr_{ст}$ — критерий Прандтля при средней для данного опыта температуре стенки элемента.

Для однородных поверхностей (змеевики) можно измерить температуру стенки в нескольких точках по длине трубки и по опытным данным построить кривую изменения температуры стенки. На этот же график нанести прямую $t_i = \text{const}$ и экспоненциальную кривую изменения разности температур между водой и раствором вдоль поверхности теплообмена, построенную по известным $\Delta t_n = \Delta t_0$

и $\Delta t_k = \Delta t_m$ (рис. 3). В сечении, где разность температур воды и раствора

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_0 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t_m}},$$

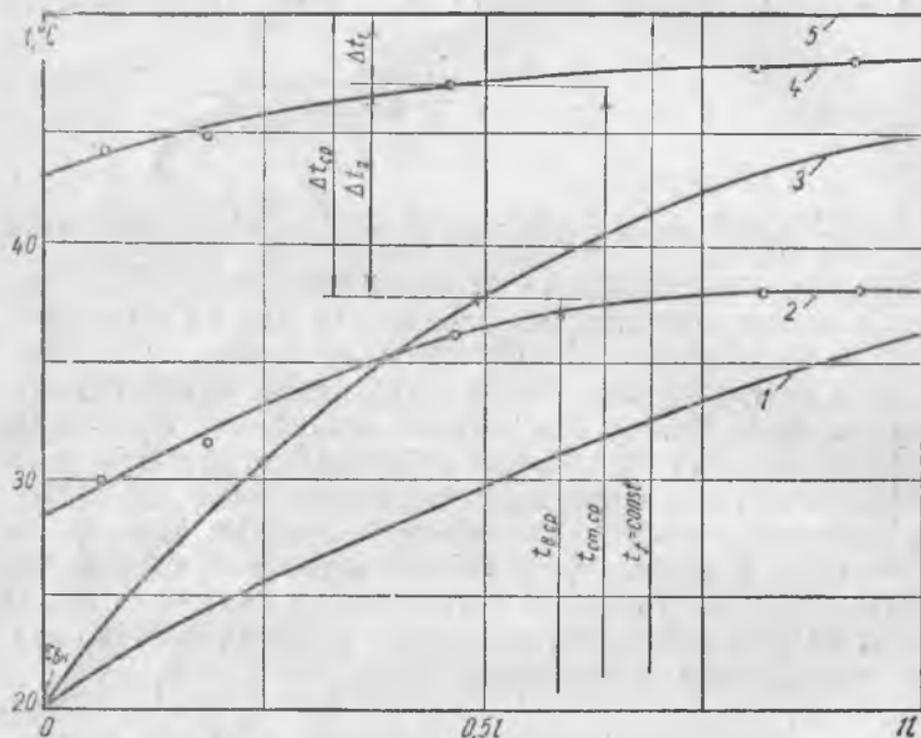


Рис. 3. График изменения температуры воды и стенки вдоль поверхности теплообмена для вертикального змеевика диаметром 6 мм в воде с $t_f = \text{const}$ при $t_{вн} = 20^\circ \text{C}$ и $A = 5 \text{ мм}$:

1 и 2 — изменение температуры воды и стенки при $n = 0$; 3 и 4 — изменение температуры воды и стенки при $n = 1000 \text{ кол/мин}$; 5 — $t_f = \text{const} = 50^\circ \text{C}$.

следует графически определить соотношение разностей температур $t_f - t_{ст. ср} = \Delta t_1$ и $t_{ст. ср} - t_{в. ср} = \Delta t_2$, $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$.

Если пренебречь $\sum \frac{\delta}{\lambda}$, то при $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \rho = \text{const}$

$$\alpha_1 = \frac{\rho + 1}{\rho} k; \quad \alpha_2 = \frac{\alpha_1 \cdot k}{\alpha_1 - k}.$$

Получим α_1 и α_2 , отнесенные к средней поверхности. Для получения их истинного значения надо умножить α_1 на $\frac{F}{F_1}$ и α_2 на $\frac{F}{F_2}$.

В нашем случае α_1 является средним коэффициентом теплоотдачи для элемента в целом [6]. Он зависит от многих факторов и представляет собой функцию нескольких переменных, вид которой не может быть в общем случае определен теоретически.

Для дисковых и пластинчатых элементов нет возможности построить кривую изменения температуры стенки вдоль поверхности теплообмена.

Коэффициенты α_1 и α_2 для дисковых и пластинчатых элементов можно приближенно определить путем соответствующего анализа зависимости k от скорости воды v внутри элемента при средней вибрационной скорости $u = \text{const}$

($u = 4Af = \frac{An}{15}$) и зависимости $k = \varphi(Af)$ при $v = \text{const}$

Метод подобного изучения теплоотдачи для трубчатого теплообменника предложен Б. С. Петуховым [9]. Аналогичная методика использовалась советскими и зарубежными исследователями при изучении теплопередачи в пластинчатых теплообменниках, где измерение температуры стенки связано с преодолением больших технических трудностей и значения температур в отдельных точках нельзя осреднить [2].

Зависимость α_2 от скорости воды можно представить в виде степенной функции $\alpha_2 = Bv^n$, где B и n постоянные.

Это возможно, когда во всем диапазоне скоростей режим движения жидкости остается неизменным.

Вид зависимости $\alpha_2 = \varphi(v)$ определяли при средней для исследуемого интервала интенсивности колебаний (например, при $A = \text{const}$, $n = 0 \div 2000$ к/мин; опыты велись при $n = 1000$ к/мин). Изменение $t_{\text{ст}}$ при постоянной интенсивности колебаний и изменении расхода воды через элемент влияет на α_1 незначительно. Это влияние частично может быть учтено для пластинчатых элементов на основании данных, полученных для змеевиков.

Приняв $\alpha_1 = \text{const}$, получим

$$\frac{1}{k} = \text{const} + \frac{1}{Bv^n}.$$

Зная по результатам опытов зависимость $k = \varphi(\nu)$, графически находим показатель степени n и определяем постоянную B .

Коэффициент α_2 при $\nu = \text{const}$ мало меняется с изменением произведения Af относительно его значения, определяемого при примерно средней интенсивности колебаний (рис. 4).

Определив α_2 для данного расхода воды и зная зависимость $k = \varphi(Af)$ при $\nu = \text{const}$, можно найти $\alpha_1 = \varphi(Af)$.

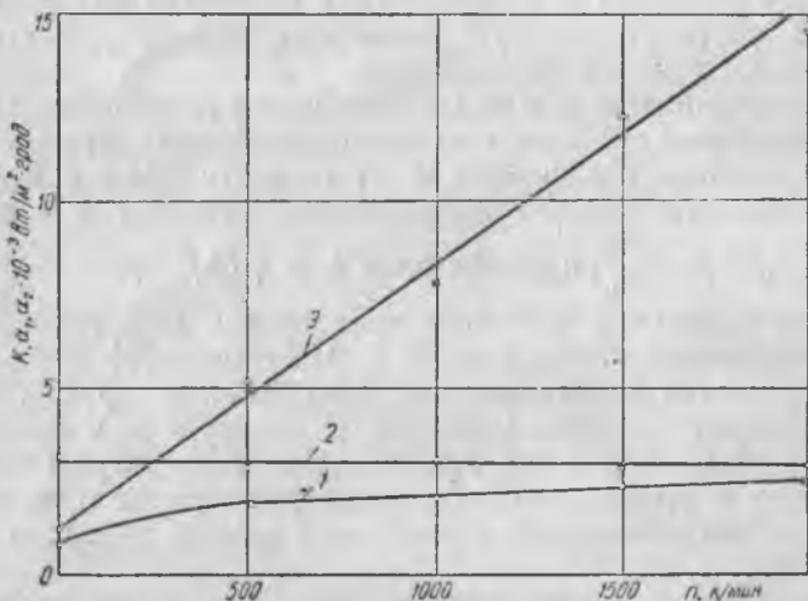


Рис. 4. График зависимости k , α_1 и α_2 от частоты колебаний при $A=5$ мм для вертикального змеевика диаметром 6 мм в воде при $t_j=50^\circ$ и $t_{вн}=20^\circ$ С:

1 — $k=\varphi(n)$; 2 — $\alpha_2=\varphi(n)$; 3 — $\alpha_1=\varphi(n)$.

Вести вычисление α_2 по формулам для теплоотдачи при движении жидкости в трубах и каналах нельзя, так как внутри элементов теплообмена нет гидродинамически стабилизированного движения воды.

При малой интенсивности колебаний в высоковязких производственных сахарных растворах и при больших расходах воды через элемент теплообмена $\alpha_2 \gg \alpha_1$ можно считать $\alpha_1 \approx k$.

По предварительным данным, в вязких средах типа пасток сахарного производства колебания теплообменной поверхности интенсифицируют теплообмен в несколько раз,

хорошо прорабатывают (перемешивают) близлежащий объем продукта, что при определенной интенсивности колебаний приводит к выравниванию температуры в прорабатываемых колебаниями зонах, и тепловой пограничный слой сужается до нескольких миллиметров вместо примерно 250 мм в промышленных кристаллизаторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. А с н и н Я. И. Тепловое подобие, конвективный теплообмен и энтропия. Изд-во ХГУ им. Горького, Харьков, 1962.
2. Б а р а н о в с к и й Н. В. Пластинчатые теплообменники пищевой промышленности. Машгиз, М., 1962.
3. К а л а ш н и к о в Н. В., Ч е р н и к и н В. И. — Теплоэнергетика, 1958, 10.
4. К р е м н ь о в О. А. та ін. — В кн.: Теплообмін та гідродинаміка, 26. Вид-во АН УРСР, К., 1964.
5. К р е м н е в О. А., С а т а н о в с к и й А. Л. — В кн.: Теплофизика и теплотехника. «Наукова думка», К., 1964.
6. К у р о е д о в В. А. Об основах расчета теплообменных аппаратов. Машгиз, М., 1951.
7. М и х е е в М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, М. — Л., 1956.
8. Новые физические методы обработки пищевых продуктов. Гостехиздат УССР, К., 1963.
9. П е т у х о в Б. С. Опытное изучение процессов теплопередачи. Госэнергоиздат, М. — Л., 1952.
10. Р е б и н д е р П. А., М и х а й л о в Н. В. — Вестник АН СССР, 1961, 10.