

# ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

УДК 664.126.046.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ПОДОГРЕВАТЕЛЯХ СВЕКЛОСАХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. А. ПОЧЕЧУН, Б. М. ЯНЧУК,  
Л. С. АРТЮХОВА,  
НПО «Пищемаш»  
К. О. ШТАНГЕЕВ, В. Н. ГОРОХ  
НПО «Сахар»  
В. И. ГОМОН  
НИИСТ

В сахарной промышленности для нагрева соков и сиропов в настоящее время применяются 10-ходовые теплообменные аппараты с гладкими теплообменными трубами, основной недостаток которых — существенное снижение во времени коэффициента теплопередачи за счет интенсивного образования отложений на теплообменных трубах.

Отложение накипи в основном определяет термическое сопротивление тепловому потоку. Для борьбы с этим явлением используют различные методы искусственной турбулизации потока.

Один из методов интенсификации теплообмена в подогревателях — повышение степени турбулизации потока путем увеличения скорости жидкости в теплообменных каналах.

Увеличение скорости нагреваемой жидкости интенсифицирует процесс теплообмена и тем самым позволяет уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость подогревателей, а также снизить эксплуатационные затраты. Разработанные в последнее время секционные подогреватели с ускоренным движением нагреваемой жидкости в гладких теплообменных трубах позволили интенсифицировать теплообмен при нагреве диффузионного сока примерно в 2,5—3 раза [1, 2]. Увеличение скорости нагреваемой жидкости примерно в 2 раза привело к резкому уменьшению накипобразования. Повысить скорость нагреваемой жидкости в секционных подогревателях позволили их конструктивные особенности.

Несмотря на то что в секционных подогревателях уменьшилось число ходов и была несколько усовершенствована гидродинамика течения жидкости, рост гидравлического сопротивления при повышенных скоростях все же опережает степень интенсификации теплообмена, т. е. интенсификация теплооб-

мена за счет турбулизации всего потока жидкости требует дополнительных энергетических затрат.

В последнее время в различных отраслях промышленности начали исследовать и использовать другой метод интенсификации теплообмена, основанный на турбулизации потока лишь в пристенной области, создавая на поверхности теплообмена искусственную шероховатость в виде выступов небольшой высоты или канавок, расположенных поперек движения потока теплоносителя [3—9], причем, как показано в работах [4, 5, 8], для шероховатостей определенной формы и размеров можно достигнуть большего роста значений коэффициентов теплоотдачи, чем будет при этом рост гидравлического сопротивления. Такой вывод является весьма важным для практических целей.

Искусственная шероховатость позволяет создать вихри в пристенном слое жидкости и за счет этого значительно турбулизировать его, что существенно снижает скорость отложения накипи на теплообменной поверхности. Исследованиями [8] установлено, что величина термического сопротивления накипи внутри теплообменных труб с кольцевыми турбулизаторами (ТТКТ) значительно (примерно в 2 раза) ниже, чем в гладких трубах при тех же условиях.

НПО «Пищемаш», НПО «Сахар» и НИИСТ, учитывая возможность снижения термического сопротивления, проверили эффективность использования таких труб в подогревателях свеклосахарного производства.

Работу ТТКТ в свеклосахарном производстве исследовали на Яготинском экспериментальном сахарном заводе. Был использован заводской подогреватель диффузионного сока II группы, обогреваемый паром IV корпуса пятикорпусной выпарной установки ( $t_p = 95—100^\circ\text{C}$ ). Подогреватель вертикальный кожухотрубный, 12-ходовый по соку. Два хода были набраны из ТТКТ, а остальные 10 ходов — гладкими трубами.

Заготовкой для изготовления ТТКТ (рис. 1) служили гладкие трубы диаметром 30—33 мм из нержавеющей стали. Профилирование труб осуществлялось путем накатки роликами по наружной поверхности кольцевых углублений треугольной формы глубиной 0,7 мм и шириной основания 1,1 мм. Шаг накатки 7,7 мм (или 0,25 диа-

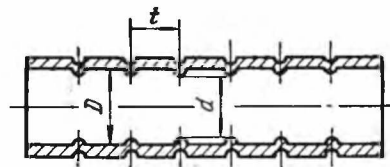


Рис. 1. Труба с кольцевыми турбулизаторами потока (ТТКТ)

метра трубы). Проведенные измерения показали, что поверхность ТТКТ больше поверхности заготовки — гладкой трубы — той же длины на 3,5 %.

Установка в одном и том же подогревателе гладких теплообменных труб и ТТКТ позволила сравнить их работу почти в идентичных условиях по качеству, скорости движения нагреваемого сока и параметрам греющего пара.

Температура сока и пара измерялась тарированными хромель-копелевыми термометрами. Расход сока определялся по показаниям индукционного расходомера ИР-11.

Схема подключения подогревателя и его оснащение контрольно-измерительными приборами приведены на рис. 2.

Задачей исследований было сопоставление величин коэффициента теплопередачи на гладких теплообменных трубах и ТТКТ, а также измерение интенсивности теплообмена на них в зависимости от длительности работы. Для установления влияния скорости движения жидкости на интенсивность теплообмена на части труб в подогревателе ставились заглушки.

Коэффициент теплопередачи  $K$  для гладких труб определялся по наружному диаметру, для ТТКТ — условно по наружному диаметру исходной трубы. Расчетная формула для коэффициента теплопередачи

$$K = \frac{V \rho c}{F} \ln \frac{t_n - t'_c}{t_n - t''_c}$$

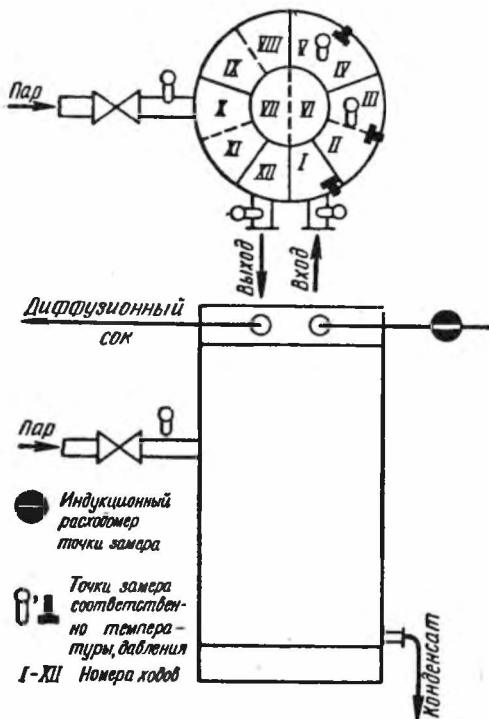


Рис. 2. Схема экспериментального подогревателя

где  $V$  — секундный объемный расход сока,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\rho$  — плотность сока,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,

$c$  — теплоемкость сока,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$F$  — поверхность нагрева,  $\text{м}^2$ ,

$t_n$  — температура пара,  $^\circ\text{C}$ ;

$t'_c, t''_c$  — температура сока на входе и выходе из рассматриваемого участка,  $^\circ\text{C}$ .

Потеря напора на прокачку сока через участки с ТТКТ и гладкими трубами определялась по показаниям образцовых манометров с ценой деления 0,0016 МПа.

Замеры проводились с интервалом 5—10 мин на протяжении 3—4 ч дневных смен.

Подогреватель работал без остановок в течение всего цикла измерений, длительность которого была от 10 сут до 1 мес. Так как подогреватель работал в обычных производственных условиях, во время проведения опытов менялись скорость сока и значения температур. Были и остановки подогревателя (прекращение подачи сока) длительностью от получаса до нескольких часов. Это приводило к увеличению разброса значений коэффициента теплопередачи и затрудняло обработку данных, однако позволило проверить работу ТТКТ в реальных производственных условиях.

Зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  от длительности работы гладких труб и ТТКТ приведена в полулогарифмических координатах на рис. 3. Как видно из рис. 3, на гладких трубах в начальное время работы коэффициент теплопередачи быстро падает, однако после 70—100 ч работы он стабилизируется и незначительно изменяется относительно некоторого среднего значения, характерного для данной скорости. Его величина определяется скоростью подачи сока и не зависит от времени работы. Такое изменение во времени коэффициента теплопередачи в подогревателях сахарного производства для гладких труб было установлено и ранее [10, 11].

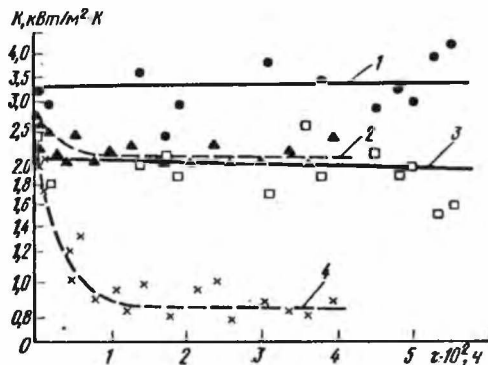


Рис. 3. Изменение коэффициента теплопередачи во времени:

1 — ТТКТ,  $W=2,5$   $\text{с}/\text{м}$ ; 2 — ТТКТ,  $W=1,65$   $\text{м}/\text{с}$ ;  
3 — гладкие трубы,  $W=2,5$   $\text{м}/\text{с}$ ; 4 — гладкие трубы,  $W=1,65$   $\text{м}/\text{с}$

Зависимости коэффициента теплопередачи от времени работы подогревателя для гладких труб при скорости 2,5 м/с (рис. 3, кривая 3) и для ТТКТ при скорости 1,65 м/с (рис. 3, кривая 2) можно объединить, так как интенсивность теплообмена в этих двух случаях практически одинакова. Однако достигнутое двумя различными способами интенсификации практически одинаковое увеличение интенсивности теплообмена в сравнении с теплообменом в гладкой трубе при скорости 1,65 м/с (рис. 3, кривая 4) получено неодинаковым увеличением гидравлического сопротивления теплообменных труб. Так, увеличение скорости движения сока в 1,5 раза повысило гидравлическое сопротивление в 2,3 раза, а использование труб с кольцевыми турбулизаторами привело к увеличению сопротивления только в 0,53 раза (рис. 4).

С увеличением среднеэксплуатационной скорости сока росла и величина коэффициента теплопередачи как для ТТКТ, так и для гладких труб. Причем для ТТКТ коэффициент теплопередачи всегда был в 1,5—2,5 раза выше при прочих равных условиях. Все это говорит о преимуществах ТТКТ при нагреве накипеобразующих жидкостей, по крайней мере при нагреве диффузионного сока.

Следует отметить, что в начале работы подогревателя, т. е. для чистой поверхности теплообмена преимущества ТТКТ в интенсификации теплообмена по сравнению с гладкими теплообменными трубами значительно меньше (примерно на порядок), чем при длительном времени работы аппарата на накипеобразующих растворах.

Таким образом, преимущества ТТКТ достигаются как за счет интенсификации конвективной теплоотдачи в пристенном слое, так и за счет уменьшения отложений на поверхности теплообмена. Так, например, после 400 ч непрерывной работы подогреватель был остановлен и очищен механическим способом от отложений накипи. Количество отложений на профили-

рованных трубах при одинаковых среднеэксплуатационных показателях оказалось в 4 раза меньше, чем на гладкостенных.

Приведенные на рис. 4 зависимости  $\Delta p = f(w)$  характеризуют потерю напора при движении сока в профилированных и гладкостенных трубах. Гидравлическое сопротивление при скорости сока  $w=1,65$  м/с в ТТКТ увеличивается в 0,53 раза по сравнению с гладкостенными трубами, а интенсивность теплообмена при этом возрастает примерно в 0,7 раза.

Результаты проведенных испытаний указывают на опережающий рост интенсивности теплообмена по сравнению с ростом гидравлического сопротивления в ТТКТ данной геометрии, причем чем меньше турбулизация всего потока жидкости в теплообменном канале, тем эффективнее влияние турбулизации в пристенной области.

Проведенные исследования по применению ТТКТ в подогревателях сахарного производства дали обнадеживающие результаты. Дальнейшей задачей является определение оптимальных параметров ТТКТ и режимов их работы для всех видов соков и сиропов свеклосахарного производства, что необходимо для широкого их использования в отрасли.

Установлено также, что применение теплообменных труб с кольцевыми турбулизаторами потока в пристенной области является эффективным способом интенсификации теплообмена при нагреве диффузионного сока.

#### Список использованной литературы

1. Применение секционных подогревателей А2-ППС-60 и теплообменников А2-ПТС-40 для нагрева диффузионного сока / [А. А. Почечун, Б. М. Янчук, И. А. Глузман, Ю. С. Разладни]. — Сахарная промышленность, 1983, № 4, с. 50—53.
2. Нагрев диффузионного сока в секционных аппаратах для заводов мощностью 6 тыс. т / [Ю. С. Разладни, Б. М. Янчук, А. А. Почечун, В. А. Селитовский]. — Сахарная промышленность, 1984, № 1, с. 35—38.
3. Гомелаури В. И. Влияние искусственной шероховатости на конвективный теплообмен. — Труды института физики АН Грузинской ССР, 1963, т. 9, с. 3—30.
4. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1972. — 220 с.
5. Аронов И. З., Гомон В. И., Дрейцер Г. А. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления при течении воды в трубе с кольцевыми турбулизаторами. — В сб.: Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах энергетических установок и техники. Серия Гидравлика. — М., ВЗМИ, 1978, вып. 7, с. 101—114.
6. Букии В. Г. Интенсификация теплоотдачи хладагентов в аппаратах холодильных машин. — Холодильная техника, 1980, № 6, с. 20—23.
7. Интенсификация конвективного теплообмена / [В. Л. Лельчук, Ю. М. Никитин, Е. И. Пупков и др.]. — Теплоэнергетика, 1980, № 2, с. 57—60.

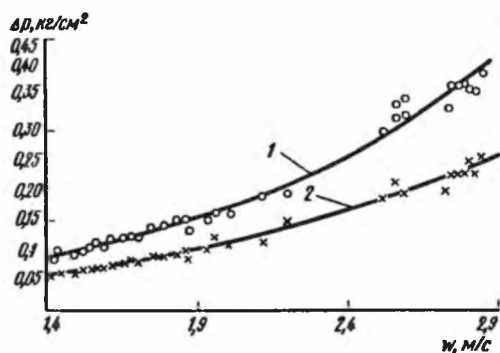


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости течения сока:

1 — ТТКТ; 2 — гладкая труба

8. Дрейцер Г. А., Гомои В. И., Аронов И. З. Сравнительные исследования величины отложений в трубах с кольцевыми турбулизаторами и в гладких трубах кожухотрубчатых теплообменных аппаратов. — Промышленная теплотехника, 1981, № 6, с. 36—42.

9. Диплом № 242 (СССР). — Б. И. 1981, № 35.

Ю. Разладни Ю. С., Сагань И. И. Влияние гидродинамических условий на накипеобразование в подогревателях сахарных соков. — Сахарная промышленность, 1983, № 9, с. 26—29.

11. Богорош А. Т., Федоткин И. М., Гулый И. С. Накипеобразование и пути его снижения в сахарной промышленности. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. — 191 с.