

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА

(Учебный пример)

Февраль 1998 г.

Владимир Герасимов, Марк Баркан

gerasimovvladimir@gmail.com

впервые опубликовано на сайте

<http://www.metodolog.ru/01173/01173.html>



Рисунок Виктора Богорада

Простое и эффективное техническое решение, расписанное ниже в качестве учебного примера, было получено еще в 50-е годы прошлого века. Спустя три десятилетия

журнал «Химия и жизнь» опубликовал материалы, к которым мы отсылаем всех, кого заинтересует техническая суть дела:

1. Холмская А. О пользе вихрей. Химия и жизнь, № 1, 1982, с. 63-67
2. Возвращение к вихрям. Ответы проф. Дрейцера Г.А. на вопросы читателей. Химия и жизнь, № 9, 1982, с. 15-18
3. Дрейцер Г.А. И снова вихри. Химия и жизнь, № 10, 1986, с. 44-49

Тем же, кому интересна, прежде всего, методика решения изобретательских задач, сообщаем: пример расписан по 11-ти шаговому алгоритму объединения альтернативных систем «образца 1998 года» и приводится здесь практически без корректировки. Имеется версия на английском языке.

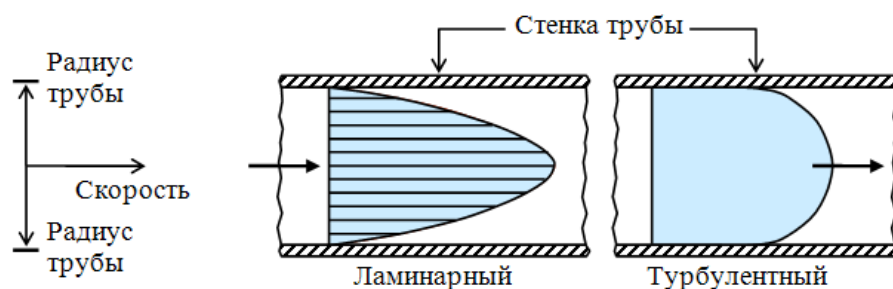
Авторы
Июнь 2007 г.

1. Исходная ситуация

- указать объект анализа и привести его краткую характеристику.

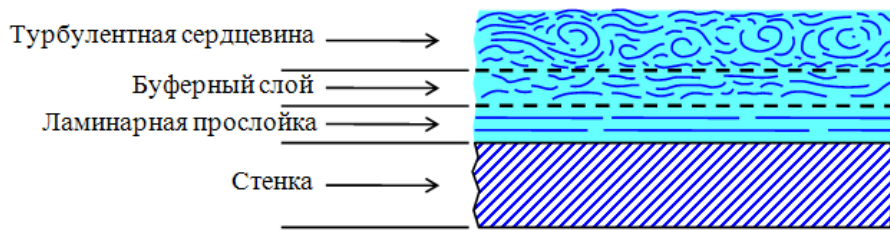
Труба теплообменника.

При малой скорости потока в гладкой трубе (число Рейнольдса $Re < 2300$) режим движения жидкости ламинарный, а при высокой скорости ($Re > 10000$) – турбулентный (фиг. 1).



Фиг. 1. Профили скоростей ламинарного и турбулентного потоков в трубе.

В диапазоне от $Re < 2300$ до $Re > 10000$ режим переходный от ламинарного к турбулентному [1]. Во всех случаях, даже когда поток в трубе турбулентный, в узком пристенном слое течение ламинарное (фиг. 2).



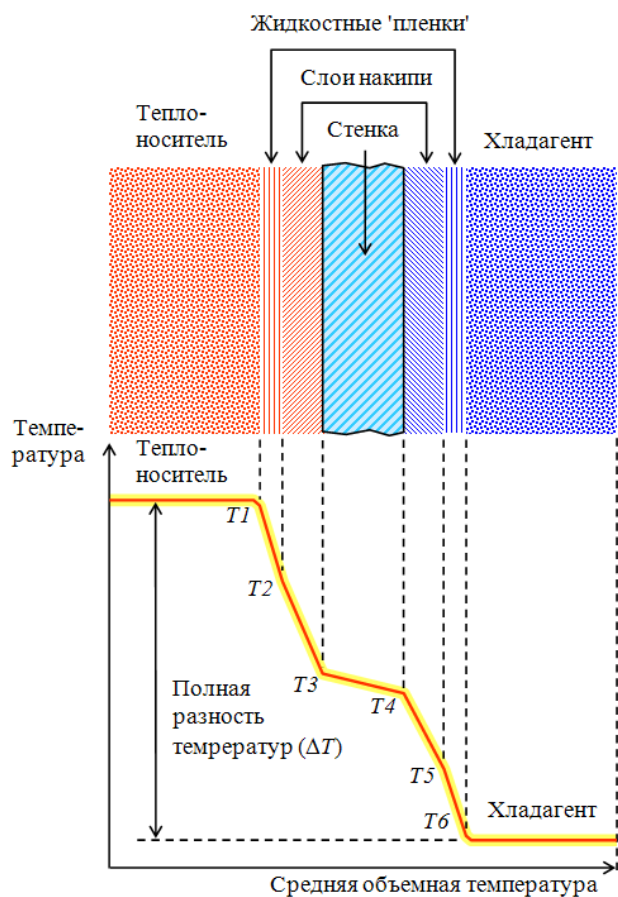
Фиг. 2. Схема потока в пристенном слое

- сформулировать главную функцию объекта.

Отводить тепло от жидкости, движущейся внутри трубы.

- описать проблемы:
 - отметить недостатки объекта, которые нужно устранить (либо отсутствующие достоинства, которые нужно добавить);
 - отметить достоинства объекта в паре с его недостатками (сформулировать в виде противоречия);
 - указать ограничения на изменения – вообще ничего нельзя менять; менять можно, но только частично; можно менять все и т.д.

Вблизи стенки трубы происходит в основном только молекулярный перенос тепла, поэтому теплопередача затруднена. Скорость потока возле стенки близка к нулю, поэтому труба изнутри постепенно покрывается накипью. Это дополнительно ухудшает теплопередачу (фиг. 3).



Фиг. 3. График изменения температуры между теплоносителем и хладагентом

ПРОТИВОРЕЧИЕ. Гладкие трубы дешевы и технологичны; гидравлическое сопротивление при работе с ламинарным или слабо турбулизированным потоком сравнительно невелико. Однако в пристенном слое при этом затруднен теплоперенос, кроме того, на стенках трубы образуется накипь. Необходимо увеличить коэффициент теплопередачи через стенку трубы и предотвратить образование накипи.

Допускаются такие изменения формы труб и режима их использования, которые не приведут к значительному росту трудоемкости, увеличению затрат на материалы и повышенному расходу энергии при эксплуатации теплообменников.

2. Альтернативная система

Альтернативная система – это объект с той же главной функцией, что и исходный, но со взаимно противоположными достоинствами и недостатками.

В зависимости от обстоятельств, следует:

- воспользоваться единственной реально существующей системой;
- выбрать одну из нескольких реально существующих конкурирующих систем;

- скомпоновать собирательный образ из нескольких реально существующих конкурирующих систем;
- предложить гипотетическую систему (такую, которой по факту нет, но в принципе понятно, как ее сделать);
- придумать фантастическую систему (такую, реализовать которую невозможно без нарушения известных законов природы).

Сильная турбулизация потока разрушает пристенный ламинарный слой. За счет этого увеличивается коэффициент теплопередачи и предотвращается отложение накипи на стенке.

Известны многочисленные способы турбулизации потока. Например, используют витые трубы, вставляют в трубы разнообразные статические смесители, выдавливают на поверхности ребра, покрывают стенки резьбой, делают их шероховатыми и т.д. Все эти варианты можно условно рассмотреть как один – **дополнительное устройство для сильной турбулизации потока в трубе**.

Применение любого устройства для сильной турбулизации потока требует расплаты. Так при увеличении теплопередачи через стенку трубы в 2 – 3 раза гидравлическое сопротивление системы растет в 10 – 12 раз. Кроме того, стоимость теплообменников с модернизированными трубами резко увеличивается.

3. Альтернативное противоречие

При сравнении достоинств и недостатков исходной и альтернативной систем, следует:

- привести полную формулировку по типу технического противоречия (ТП): «Если система А, то хорошо это, а плохо то; если система Б, то наоборот – хорошо то, а плохо это»;
- привести полную формулировку по типу физического противоречия (ФП): «Система должна быть А, чтобы было хорошо это, и система должна быть Б, чтобы было хорошо то»;
- привести краткую формулировку обостренного противоречия: «Система должна быть А, и система должна быть Б»;
- Отметить возможные способы разрешения противоречия (во времени, в пространстве, системным переходом).

Противоречие по типу ТП. Если труба гладкая, а поток в ней ламинарный или слабо турбулизованный, то гидравлическое сопротивление мало, но при этом сильно ухудшен коэффициент теплопередачи, и на стенках откладывается накипь. Если каким-либо способом поток сильно турбулизован, то коэффициент теплопередачи увеличивается в

2 – 3 раза, накипь на стенках не откладывается, но в 10 – 12 раз вырастает гидравлическое сопротивление системы; кроме того, сильно дорожает оборудование.

Противоречие по типу ФП. Труба должна быть гладкой, а поток в ней ламинарным или слабо турбулизированным, чтобы обеспечить низкую стоимость оборудования, малое гидравлическое сопротивление и малые энергозатраты на прокачку жидкости. Труба должна содержать специальные устройства для сильной турбулизации потока, чтобы обеспечить высокий коэффициент теплопередачи и предотвратить образование накипи на стенке.

Краткая формулировка обостренного противоречия. Поток должен быть ламинарным (либо слабо турбулизированным), и поток должен быть сильно турбулизированным.

Разрешать приведенное выше противоречие следует в пространстве: сильно турбулизированным поток должен быть только в тонком пристенном слое. Именно это улучшит теплоперенос и не допустит образования накипи. В остальном объеме трубы поток может быть любым – хоть ламинарным, хоть турбулентным (каким именно – будет определено из расчета теплообменника).

4. Базовая система

- как правило, следует выбрать более простую и дешевую систему с ухудшенным функционированием;
- в случае, когда сравниваемые системы по стоимости примерно равнозначны, а отличаются особенностями функционирования, в качестве базовой следует рассмотреть по очереди каждую из них.

В качестве базовой системы выбираем гладкую трубу с ламинарным (либо слабо турбулизированным) основным потоком.

5. Оперативная зона базовой системы

- указать место, где необходимо и достаточно улучшить функционирование.

Тонкий слой жидкости непосредственно у стенки трубы.

6. Недостатки базовой систем

- указать, что подразумевается под термином “улучшить функционирование”.

Плохой теплоперенос в тонком пристенном ламинарном слое жидкости, так как он осуществляется преимущественно только за счет диффузии.

Оседание накипи на стенку из-за практически нулевой скорости потока у стенки.

7. Задача

- сформулировать по правилам построения мини-задачи: “Все остается как было, а недостаток исчезает”.

Необходимо обеспечить, чтобы труба осталась гладкой, а основной поток в ней ламинарным, либо слабо турбулизованным. В пристенном слое ламинарный поток жидкости должен исчезнуть.

8. Ресурсы альтернативной системы

- определить, благодаря какому свойству (одному или нескольким) обеспечивается хорошее функционирование альтернативной системы;
- определить, какие именно элементы системы обеспечивают отмеченные положительные свойства;
- классифицировать выявленные свойства по “способу их действия”: во времени, в пространстве, системный переход и т.д.

Сильная турбулизация всего потока обеспечивает хороший теплоперенос в пристенной зоне, а также отсутствие накипи на стенке.

Пристенный ламинарный слой разрушают мощные вихри. Они образуются при закручивании потока в витых трубах и при срыве потока с выступов, впадин, ребер, всевозможных статических смесителей, размещенных на гладких трубах. Эти же вихри предотвращают образование отложений.

Поток постоянно сильно турбулизован во всем объеме – как в центральной зоне, так и в пристенном слое, т.е. является пространственным ресурсом.

9. Портрет ответа

- перечислить элементы базовой системы, которые обеспечивают ее преимущества;
- перенести в оперативную зону базовой системы ресурсы альтернативной.

Гладкая труба (обеспечивает низкую стоимость оборудования).

Ламинарный либо слабо турбулизованный основной поток (обеспечивает низкое гидравлическое сопротивление и малые энергозатраты на перекачку жидкости).

Сильно турбулизованный поток (обеспечивает хорошую теплопередачу, а также удаление накипи); этот ресурс альтернативной системы следует перенести только в оперативную зону базовой – в тонкий пристенный слой жидкости. Организовать вихри в этом слое следует с помощью пристенных турбулизаторов потока.

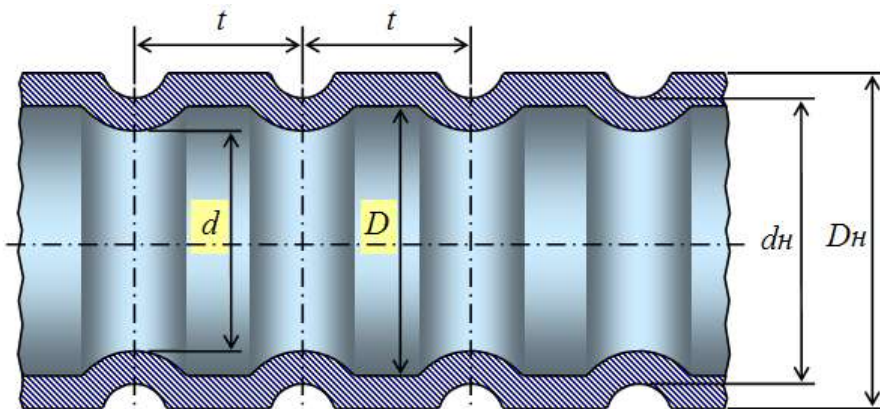
10. Техническое решение

- выявить в базовой системе элементы, которые могут полностью, либо частично заменить привнесенные извне элементы (если при согласовании элементов возникнут проблемы, рассмотреть их в качестве самостоятельных задач – см. пункт 11);
- ввести хотя бы грубую, прикидочную количественную оценку полученного решения («представить ответ в масштабе»).

Турбулизаторы потока в пристенном слое могут быть накатаны прямо на гладкой трубе в виде кольцевых канавок (на внутренней поверхности трубы получатся плавно очерченные выступы).

Высота кольцевых турбулизаторов должна быть равна толщине пристенного ламинарного слоя (примерно 3 – 5% от внутреннего диаметра трубы).

Целенаправленный информационный поиск по теме «Интенсификация теплообмена» позволил найти описание технического решения, дающего нужный эффект [2]. Для большинства случаев рекомендуются следующие размеры турбулизаторов (фиг. 4): $d / D = (0.91 - 0.935)$, $t / D = 0.5$, либо $t / D = 1$.



Фиг. 4. Продольное сечение трубы с поперечными канавками снаружи и выступами внутри

Использование в промышленности. Трубы с накатанными кольцевыми турбулизаторами широко используются в теплообменных аппаратах в разных отраслях промышленности бывшего СССР более 15 лет (по состоянию на 1998 г. – В.Г и М.Б).

Накатывать кольцевые канавки можно на простом оборудовании, стоимость труб при этом увеличивается всего на 2 – 3%.

Накатка на трубах позволяет турбулизировать только пристенный ламинарный слой, поэтому затраты энергии увеличиваются незначительно. Так при росте коэффициента теплопередачи в 2 раза гидравлическое сопротивление увеличивается только в 2.5 раза (при турбулизации всего потока оно вырастает более чем в 10 раз).

В литературе описано использование кольцевых турбулизаторов для эффективного уменьшения отложений в трубах [3].

Для больших труб преимущества усиливаются, так как при увеличении диаметра трубы затраты на турбулизацию всего потока растут пропорционально площади поперечного сечения, а затраты на пристенную турбулизацию – пропорционально только ее периметру.

Решение защищено многочисленными авторскими свидетельствами на изобретения СССР. По этой теме есть много публикаций в литературе.

В 1981 году зарегистрировано открытие «Закономерности изменения теплопередачи на стенках каналов с дискретной турбулизацией потоков при вынужденной конвекции» (диплом № 242).

Практические рекомендации по выбору способа интенсификации, расчетам теплопередачи и гидравлических потерь, в том числе и при солеотложениях на поверхности труб содержатся в книге [2].

11. Последствия от изменений

- отметить положительные последствия в надсистеме;
- указать недостатки, которые не удалось устранить при объединении альтернатив, либо те, которые возникли в результате этого объединения.

Это учебный пример, поэтому рекомендации не выполнены.

* * *

ЛИТЕРАТУРА

1. HEAT EXCHANGERS, Selection, Design & Construction E.A.D. Saunders, B. Sc., C. Eng., M. I. Mech. E. (Longman Scientific & Technical).
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. 3-е изд., перераб. и доп. – Машиностроение, 1990. – 208 с.
3. Дрейцер Г.А., Гомон В.И., Аронов И.З. Сравнительное исследование величины отложений в трубах с кольцевыми турбулизаторами и в гладких трубах кожухотрубчатых аппаратов / Промышленная теплотехника. 1981. Т. 3. № 6. С. 36 – 42.