

*Серебренов Тимофей Владимирович*

курсант

*Научный руководитель*

*Солодовников Алексей Витальевич*

доцент

Филиал ФГКВОУ ВО «Военная академия  
Ракетных войск стратегического назначения  
им. Петра Великого» Минобороны России  
г. Серпухов, Московская область

## **КОЖУХОТРУБНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ВСТАВОК-ТУРБУЛИЗАТОРОВ В ТРУБНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

*Аннотация:* автор статьи отмечает, что кожухотрубные теплообменники остаются базовым типом аппаратов в теплоснабжения и промышленности благодаря прочности, ремонтпригодности и широкому диапазону рабочих параметров. На фоне ужесточения требований к габаритам и энергопотреблению всё чаще рассматривают способы интенсификации теплообмена без увеличения поверхности, в том числе за счет вставок-турбулизаторов в трубном пространстве. В статье описаны типовые конструкции кожухотрубных аппаратов, приведена классификация турбулизаторов (скрученные ленты, пружинные и винтовые вставки, профилированные ленты), а также рассмотрены зоны установки и эксплуатационные ограничения: рост перепада давления, загрязнение, особенности очистки и доступности трубного пучка.

*Ключевые слова:* кожухотрубный теплообменник, трубный пучок, турбулизатор, скрученная лента, пружинная вставка, интенсификация, перепад давления, загрязнение.

### 1. Введение.

Кожухотрубные теплообменники (КТТО) применяют в системах теплоснабжения, на нефтехимических и химических предприятиях, в энергетике и в холодильной технике. Их популярность объяснима: конструкция понятна, материалы и технологии изготовления отработаны, а обслуживание возможно даже в условиях жесткой эксплуатации. Нормативные требования и область применения для отдельных классов аппаратов закреплены в стандартах, в том числе для кожухотрубчатых стальных теплообменников и подогревателей водо-водяных систем теплоснабжения [1–3].

При проектировании часто возникает противоречие: с одной стороны, нужно обеспечить заданную тепловую нагрузку; с другой – ограничены габариты, масса и допустимый перепад давления (особенно со стороны насосного контура). В таких случаях рассматривают интенсификацию – то есть повышение коэффициента теплоотдачи при сохранении или умеренном росте поверхности. Один из практичных подходов – управлять течением внутри труб, используя вставки-турбулизаторы.

## *2. Конструкция КТТО и гидродинамика трубного пространства.*

Классический КТТО состоит из кожуха, трубного пучка, трубных решеток и камер (головок) со стороны трубного пространства. Теплоносители могут двигаться противотоком или прямотоком, а число ходов по трубам определяется компоновкой перегородок в камерах. Со стороны кожуха часто применяют поперечные перегородки (сегментные, дисково-кольцевые), которые повышают поперечную составляющую скорости и уменьшают зоны застойного течения.

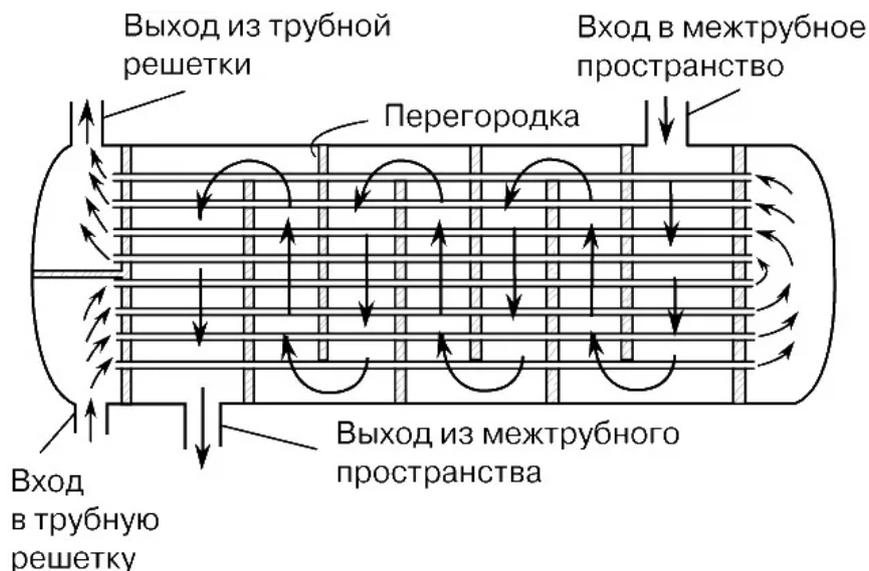


Рис. 1. Схема кожухотрубного теплообменника (схема автора) [8]

В трубном пространстве типовой режим – турбулентное течение, однако при малых расходах, высокой вязкости или ограничениях по насосу возможны переходные режимы. Даже в турбулентном потоке теплоотдача во многом определяется состоянием пристенного слоя. Именно на него и воздействуют турбулизаторы: они создают закрутку, периодические возмущения или локальные ускорения, что повышает теплоотдачу, но почти всегда увеличивает сопротивление.

### 3. Вставки-турбулизаторы: виды и принцип действия.

В практике чаще встречаются три группы вставок.

– скрученная лента (twisted tape). Простейший вариант, создающий устойчивую закрутку потока по длине трубы. Эффект хорошо описан и экспериментально подтверждён; вместе с ростом теплоотдачи заметно растёт и  $\Delta p$  [4; 5];

– пружинные и винтовые вставки (проволочные спирали). Они формируют винтовой канал и повышают турбулентность за счет периодического срыва пристенного слоя;

– профилированные ленты и комбинированные турбулизаторы (например, с насечками). Их применяют, когда нужно усилить теплоотдачу без чрезмерного сужения прохода; результаты по таким вставкам публикуются и в отечественных источниках [6].

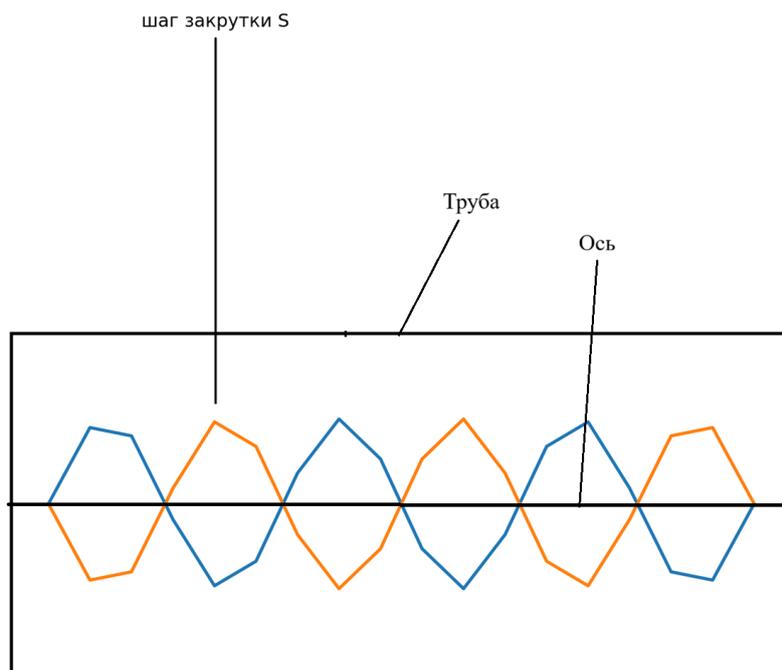


Рис. 2. Скрученная лента как вставка-турбулизатор в трубе (схема автора)

С инженерной точки зрения вставка работает «сразу в двух местах»: увеличивает среднюю скорость (из-за уменьшения живого сечения) и меняет структуру течения. Второй эффект обычно важнее первого, но именно сечение определяет, насколько быстро вырастет  $\Delta p$ . Поэтому при выборе вставки всегда оценивают, есть ли запас по перепаду давления и по мощности насоса.

#### 4. Зоны установки и «где вставка реально помогает».

Существует соблазн ставить турбулизатор на всю длину трубы. На стенде это часто дает максимальный прирост теплоотдачи. На объекте же такой подход упирается в насос, шум и обслуживание. Поэтому всё чаще используют локальные и частичные решения.

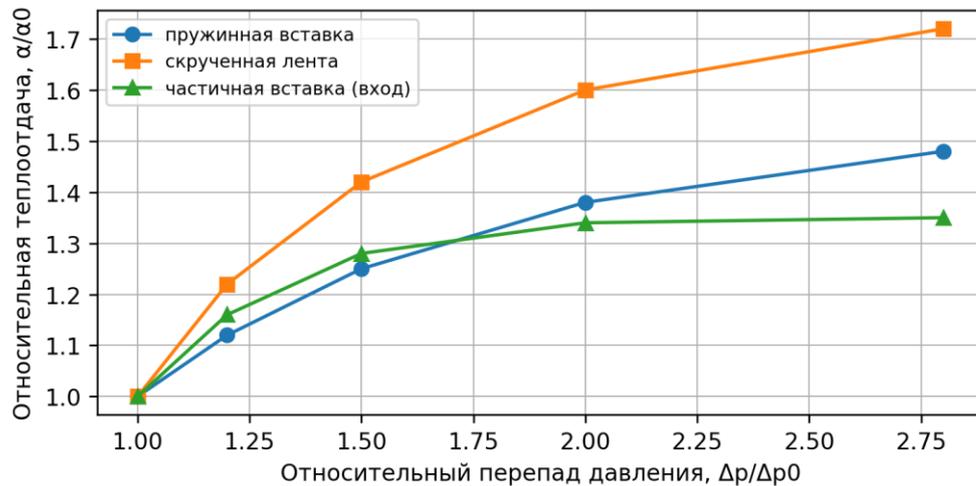


Рис. 3. Соотношение прироста теплоотдачи и потерь давления для разных вставок (концептуальный график автора)

4.1. Частичная вставка у входа. Для многих режимов достаточно возмутить поток в начальной части, чтобы снизить тепловое сопротивление в зоне развития пограничного слоя. Такой прием иногда дает приемлемое соотношение «эфф-фект/ $\Delta p$ » (см. рисунок 3).

4.2. Полная вставка по длине. Оправдана при чистых средах, стабильной фильтрации и наличии достаточного запаса по насосу.

4.3. Секционирование по рядам труб. В многотрубных аппаратах практикуют установку вставок только в части труб (например, крайних рядов), если именно там наблюдается недогрев или специфическое распределение потоков.

#### 5. Загрязнение, ремонт и промывка: ограничения эксплуатации.

Для КТТО критичны вопросы очистки трубного пучка. Любая вставка усложняет механическую очистку ершами и увеличивает требования к химической промывке. Если среда склонна к отложениям (теплосетевая вода, вода с механическими примесями), вставки могут ускорить зарастание в местах контакта и в зонах с пониженной скоростью.

Поэтому на практике действуют осторожно: сначала приводят в порядок водоподготовку и фильтрацию, проверяют реальную скорость в трубах и число ходов, а уже затем рассматривают турбулизаторы. Для водо-водяных

подогревателей теплоснабжения разумно опираться на требования стандартов и заводских руководств [2; 3].

*6. Инженерная оценка эффективности: что сравнивать.*

Для сопоставления вариантов используют: прирост коэффициента теплоотдачи, рост коэффициента трения (или потерь давления), а также интегральные показатели энергетической эффективности. Отечественные исследования по закрученному потоку в трубах показывают, что скрученная лента может быть эффективнее некоторых альтернатив по теплообмену, но требует аккуратной оценки сопротивления и длины вставки [4]. Если цель – уменьшить поверхность или габарит, полезно сравнивать варианты не на 'идеальной' воде, а на типовом диапазоне загрязнения и с реальным регламентом промывок.

*7. Практические рекомендации (когда применять и когда лучше не надо).*

1. Для чистых технологических контуров и стабильной фильтрации можно рассматривать полные вставки (скрученная лента, пружина) с обязательной проверкой  $\Delta p$ .

2. Для теплоснабжения чаще работают частичные вставки или локальные решения у входа, если есть задача «дожать» мощность без замены аппарата.

3. Для вязких сред эффективнее сначала оптимизировать число ходов и скорость в трубах: вставка может резко увеличить  $\Delta p$  и сделать режим неработоспособным.

4. Если требуется регулярная механическая очистка труб, вставки лучше исключить – они окупятся только при очень дисциплинированной химпромывке и чистой воде.

*Заключение.*

Вставки-турбулизаторы в трубном пространстве кожухотрубных теплообменников дают реальный потенциал интенсификации, особенно в режимах, где теплоотдача лимитируется состоянием пристенного слоя. Наиболее практичны решения, которые обеспечивают приемлемое соотношение прироста теплоотдачи к росту перепада давления: частичные вставки у входа и умеренные по геометрии турбулизаторы. При выборе необходимо учитывать не только расчётные

коэффициенты, но и обслуживание: промывку, доступность очистки и склонность среды к отложениям. В итоге выигрыш достигается там, где инженерно согласованы три вещи – теплообмен, гидравлика и эксплуатация.

Таблица 1

## Сравнение вставок-турбулизаторов для трубного пространства

Вставка	Эффект на теплоотдачу	Рост $\Delta p$	Риск загрязнения	Практические замечания
Скрученная лента	высокий	высокий	средний	хорошо изучена; требуется запас по насосу
Пружинная/проволочная спираль	средний	средний	средний	проще монтировать; важно избегать вибраций
Профилированная лента	средний-высокий	средний	средний	компромиссный вариант при ограничениях по $\Delta p$
Частичная вставка (вход)	средний	низкий-средний	низкий-средний	часто лучший эффект/ $\Delta p$ , но нужно подбирать длину
Перфорированные вставки	высокий	высокий	высокий	чувствительны к загрязнению; редкое применение

**Список литературы**

1. ГОСТ 31842-2012 (ИСО 16812:2007). Нефтяная и газовая промышленность. Теплообменники кожухотрубчатые. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200102944> (дата обращения: 28.02.2026).

2. ГОСТ 27590-2005. Подогреватели кожухотрубные водо-водяные систем теплоснабжения. Общие технические условия. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200049452> (дата обращения: 28.02.2026).

3. ГОСТ 15122-79. Теплообменники кожухотрубчатые. Основные параметры и размеры. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294726/4294726641.pdf> (дата обращения: 28.02.2026).

4. Лобанов И.Е. Теория и эксперимент интенсификации теплообмена для закрученного потока внутри трубы / И.Е. Лобанов, А.В. Дедов // Труды МАИ. – 2010. – Вып. 37. – URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/165/teoriya-i-eksperiment-intensifikatsii-teploobmena-dlya-zakruchennogo-potoka-vnutri-truby.pdf> (дата обращения: 28.02.2026). EDN LFDPCЕ

5. Рыженкова Н.В. Влияние конструктивных факторов на эффективность теплообменного оборудования систем теплоснабжения: дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Рыженкова. – М.: МЭИ, 2015. – URL: <https://mpei.ru/diss/Lists/FilesDissertations/131-%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf> (дата обращения: 28.02.2026). EDN SFEDMD

6. Лакиза М.В. Исследование интенсификации теплообмена в трубе профилированной лентой / М.В. Лакиза // ЛКИ (СПбГМТУ). – 2017. – URL: <https://lki.smtu.ru/ru/article/33/> (дата обращения: 28.02.2026).

7. Габбасова А.Х. Эффективность модернизации теплообменного оборудования типа «труба в трубе» для охлаждения этилена (вставки винтового типа) / А.Х. Габбасова, А.А. Ардаширова // Аллея Науки. – 2020. – №4(43). – URL: [https://alley-science.ru/domains\\_data/files/5April2020/EFFEKTIVNOST%20MODERNIZACII%20TEPLOOBMENNOGO%20OBORUDOVANIYa%20TIPa%20\\_TRUBA%20V%20TRUBE\\_%20DLYa%20OHLAZhDENIYa%20ETILENA.pdf](https://alley-science.ru/domains_data/files/5April2020/EFFEKTIVNOST%20MODERNIZACII%20TEPLOOBMENNOGO%20OBORUDOVANIYa%20TIPa%20_TRUBA%20V%20TRUBE_%20DLYa%20OHLAZhDENIYa%20ETILENA.pdf) (дата обращения: 28.02.2026).

8. Кожухотрубные теплообменники принцип работы и устройство // Резервуарный завод емкостного оборудования. – URL: <https://www.npomz.ru/blog/kozhukhotrubnye-teploobmenniki> (дата обращения: 01.03.2026).