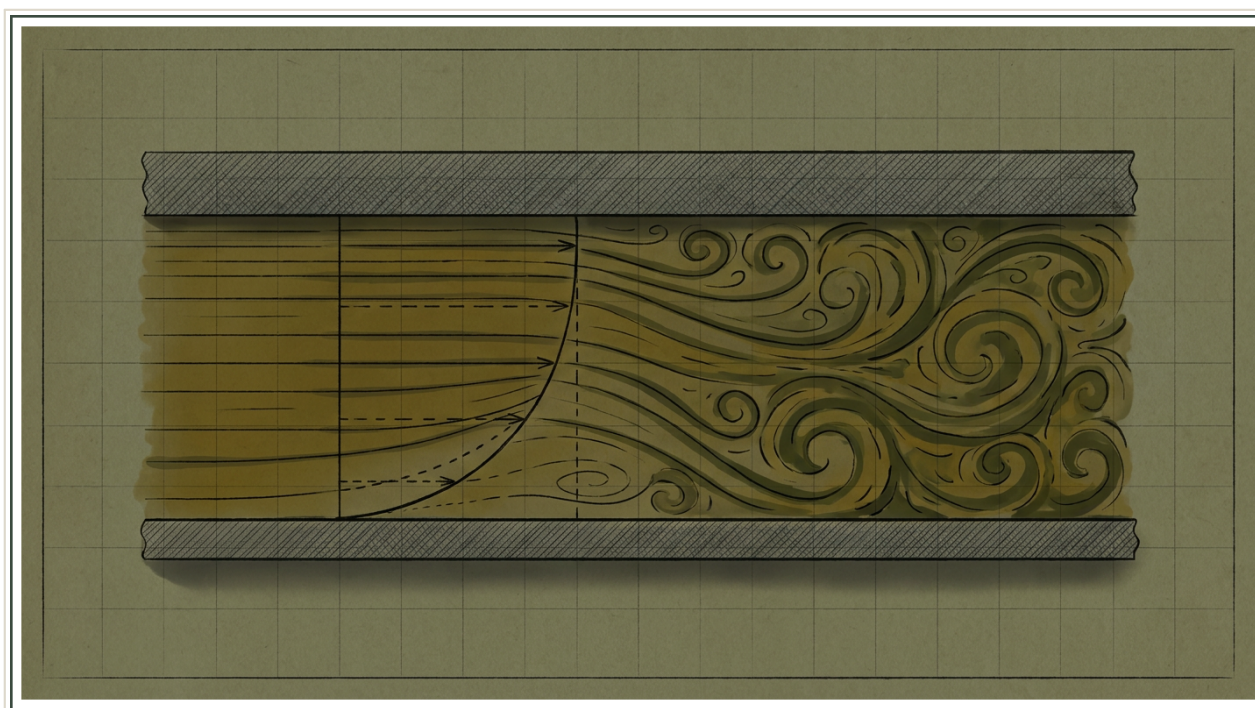


Кавитация и гидроудары в теплообменнике

теория теплообмена · формулы и вывод

Кавитация и гидроудар в теплообменнике: условие вскипания $P < P_{\text{нас}}$, таблица давления насыщения по температуре, формула Жуковского и меры защиты обвязки и аппарата.



Схлопывание кавитационных пузырьков у стенки — источник эрозии металла

Кавитация звучит экзотично, но по сути это закипание воды без нагрева — за счёт падения давления. Пузырьки пара схлопываются у поверхности с микроударами, которые выгрызают металл. В теплообменнике и его обвязке кавитация и родственный ей гидроудар способны за месяцы убить то, что должно служить десятилетия.

Коротко

Кавитация возникает, когда местное давление падает ниже давления насыщенных паров при данной температуре — вода вскипает, пузырьки схлопываются с ударной волной. Гидроудар — скачок давления при резком торможении потока. Оба разрушают металл и уплотнения.

1. Физика кавитации

У каждой температуры воды есть давление насыщения $P_{\text{нас}}$, при котором она кипит. Если в узком сечении или на всасывании насоса местное давление упадёт ниже $P_{\text{нас}}$ — вода вскипает прямо в потоке:

Условие кавитации: $P_{\text{местное}} < P_{\text{нас}}(t)$

$P_{\text{нас}}$ растёт с температурой: ~2,3 кПа при 20 °С, ~101 кПа при 100 °С, ~476 кПа при 150 °С

Горячая вода кавитирует легко: при 150 °С давление насыщения уже почти 0,48 МПа, и малейший провал давления в канале вызывает вскипание. Именно поэтому высокотемпературные контуры особенно требовательны к подпору.

t воды, °C	P _{нас} , кПа	Риск кавитации
20	2,3	минимальный
70	31	низкий
100	101	средний
130	270	высокий
150	476	очень высокий

2. Чем кавитация вредит

Схлопывание пузырька у стенки создаёт микрострую со скоростью в сотни м/с и локальным давлением до тысяч атмосфер. Повторяясь миллионы раз, эти удары выкрашивают металл — кавитационная эрозия оставляет характерные губчатые каверны. Плюс кавитация роняет расход, шумит (звук «гравия в трубе») и вибрирует.

3. Гидроудар

Гидравлический удар — скачок давления при резком изменении скорости потока (быстрое закрытие задвижки, отключение насоса). Амплитуду оценивают по формуле Жуковского:

$$\Delta P_{\text{уд}} = \rho \cdot a \cdot \Delta w$$

ρ — плотность; a — скорость звука в воде (~1200–1400 м/с); Δw — изменение скорости

пример: $\Delta P_{\text{уд}} = 1000 \cdot 1300 \cdot 1,0 \approx 1\,300\,000 \text{ Па} \approx 13 \text{ бар}$

мгновенная остановка потока со скоростью 1 м/с даёт скачок ~13 бар

Важно

13 бар от гидроудара при рабочих 6–10 бар — это перегрузка, которую уплотнения и пайка могут не пережить. Защита проста: плавное закрытие арматуры, плавный пуск/стоп насосов, гасители удара (демпферы, воздушные колпаки).

4. Защита от кавитации и удара

- поддерживать подпор на всасывании выше $P_{\text{нас}}$ — не давать давлению провалиться;
- не превышать скорости, при которых в узких сечениях падает статическое давление;
- исключить резкие манёвры арматурой — только плавное закрытие;
- ставить плавный пуск/останов насосов и обратные клапаны с демпфированием;
- для горячих контуров держать запас по давлению с учётом высокой $P_{\text{нас}}$.

5. Частые вопросы

Что вызывает кавитацию в теплообменнике?

Падение местного давления ниже давления насыщенных паров воды: в узком сечении или на всасывании насоса вода вскипает, пузырьки схлопываются с ударами. Особенно опасно на горячей воде, где давление насыщения высокое.

Как защититься от гидроудара?

Плавное закрывать арматуру и запускать/останавливать насосы, ставить демпферы и обратные клапаны с гашением. По Жуковскому даже 1 м/с мгновенной остановки даёт скачок ~13 бар.

Почему горячая вода кавитирует легче?

С ростом температуры растёт давление насыщения: при 150 °С оно уже ~0,48 МПа. Малейший провал давления в канале приводит к вскипанию, поэтому горячим контурам нужен подпор.

6. Глоссарий

Термин	Определение
Кавитация	Вскипание жидкости из-за падения давления ниже давления насыщения с последующим схлопыванием пузырьков.
Давление насыщения $P_{\text{нас}}$	Давление, при котором вода кипит при данной температуре; растёт с t .
Гидроудар	Скачок давления при резком изменении скорости потока; оценивается по формуле Жуковского.
Кавитационная эрозия	Разрушение металла микроударами схлопывающихся пузырьков — губчатые каверны.



Не уверены в расчёте — спросите инженера

Онлайн-подбор, методики и таблицы: msmteplo.ru

Инженер-консультант онлайн: [задать вопрос](#)

Телефон: 8 (800) 302-58-75 · E-mail: zakaz@msmteplo.ru

МСМ-ТЕПЛО — устройство, расчёт и подбор теплообменного оборудования.

Наведите камеру телефона на QR — откроется онлайн-консультант.

Темы документа: кавитация теплообменник, гидроудар, давление насыщения, формула Жуковского, эрозия, защита