

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **14814**

(13) **С1**

(46) **2011.10.30**

(51) МПК

F 28G 1/00 (2006.01)

B 08B 9/00 (2006.01)

(54) **СПОСОБ ОЧИСТКИ ТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА**

(21) Номер заявки: а 20090483

(22) 2009.04.02

(43) 2010.12.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Кашеев Владимир Петрович; Воронов Евгений Олегович; Кашеев Андрей Владимирович; Сорокин Владимир Николаевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) SU 1051367 А, 1983.

SU 1803705 А1, 1993.

SU 1612200 А1, 1990.

SU 1409851 А1, 1988.

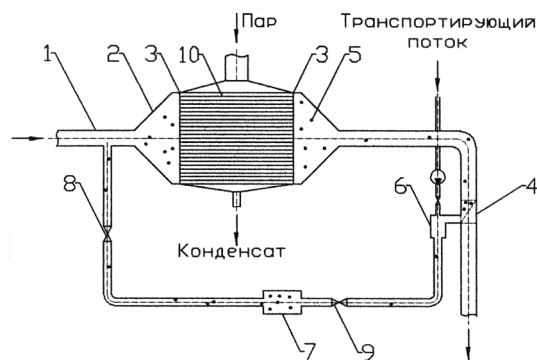
RU 94017421 А1, 1996.

SU 1413397 А2, 1988.

SU 1416853 А2, 1988.

(57)

Способ очистки трубчатого теплообменника, при котором в теплоноситель перед входом в трубчатый теплообменник вводят, по меньшей мере, три группы упругих очищающих элементов, разных по плотности, в пределах значений 0,80-1,05 от плотности теплоносителя, и пропускают их через трубки теплообменника, отличающийся тем, что используют упругие очищающие элементы с твердым покрытием и размером 0,5-0,9 от диаметра трубок теплообменника.



Изобретение относится к энергетике, в частности к технике очистки теплообменных аппаратов от отложений на внутренних поверхностях труб.

Известен способ очистки трубчатых теплообменников, реализованный в устройстве для промывки труб, содержащем направляющий механизм в виде решетки, закрепленной на трубной доске теплообменника и имеющей пазы спиралевидной формы с отверстиями, совпадающими с отверстиями в трубной доске [1].

Недостатком данного способа очистки является невысокая эффективность (удаляются только рыхлые отложения), устройство для реализации способа сложно в исполнении.

ВУ 14814 С1 2011.10.30

BY 14814 C1 2011.10.30

Известен способ очистки трубчатых теплообменников путем введения в теплоноситель упругих очищающих элементов. Этот способ реализован, в частности, в устройстве для очистки трубчатых теплообменников [2].

Согласно этому способу, перед входом в теплообменник в теплоноситель вводят однородные по плотности и размерам упругие очищающие элементы (например, губчатые шарики) в количестве 10-15 % от числа трубок теплообменника, с размерами, близкими к внутреннему диаметру трубок. Упругие очищающие элементы, проходя с теплоносителем по трубкам, удаляют с их внутренней поверхности слой загрязнений. На выходе из теплообменника упругие очищающие элементы отделяют от теплоносителя и с помощью насоса вновь вводят их в поток теплоносителя перед входом в теплообменник.

Однако этот способ не обеспечивает достаточное качество очистки верхних и нижних рядов трубок теплообменников, в особенности теплообменников с большими размерами трубных досок, например, у конденсаторов паровых турбин. Некачественная очистка верхних и нижних рядов трубок вызывается неравномерным распределением однородных очищающих тел по высоте трубной доски.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому способу является способ очистки трубчатых теплообменников, заключающийся в том, что упругие очищающие элементы вводят в теплоноситель перед входом в теплообменник и пропускают их через трубки теплообменника, при этом, с целью повышения качества очистки путем равномерного распределения очищающих элементов по сечению теплообменника, в теплоноситель вводят, по меньшей мере, три группы упругих очищающих элементов, в первой из которых используют упругие очищающие элементы с плотностью 80-85 % от (ρ) в количестве 2-3 % от N, во второй - с плотностью 90-95 % от (ρ) в количестве 6-7 % от N, в третьей - с плотностью 100-105 % от (ρ) в количестве 2-3 % от N, где (ρ) - плотность теплоносителя, N - общее число очищаемых трубок теплообменника [3]. В соответствии с соотношениями плотности упругие очищающие тела распределяются по трубкам по высоте трубной доски. Группа, содержащая тела наименьшей плотности (80-85 % от плотности теплоносителя), распределяется по верхним рядам трубок, а группа с телами наибольшей плотности - по нижним рядам трубок. Меньшее число упругих тел в группах с очищающими телами минимальной и максимальной плотности определяется уменьшением числа трубок в ряду с увеличением расстояния по вертикали от центра круглой трубной доски до верхнего и нижнего концов трубной доски. Проходя по трубкам, очищающие тела удаляют с их внутренней поверхности загрязнения. На выходе из теплообменника очищающие тела отделяют от теплоносителя и вновь вводят в поток теплоносителя перед теплообменником с помощью насоса.

На практике оказалось, что этот способ не обеспечивает качественной очистки трубчатых теплообменников при использовании в качестве охлаждающей воды технической воды с большим содержанием посторонних примесей и солей. К тому же застарелые затвердевшие отложения такой способ вообще не удаляет.

Задачей изобретения является повышение качества очистки внутренней поверхности трубок трубчатых теплообменников, а также повышение эффективности и надежности работы всей энергоустановки при существенном сокращении топливных, материальных и трудовых затрат.

Указанная задача достигается тем, что в способе очистки трубчатого теплообменника, при котором в теплоноситель перед входом в трубчатый теплообменник вводят, по меньшей мере, три группы упругих очищающих элементов, разных по плотности, в пределах значений 0,80-1,05 от плотности теплоносителя, и пропускают их через трубки теплообменника, используют упругие очищающие элементы с твердым покрытием и размером 0,5-0,9 от диаметра трубок теплообменника.

Для равномерной очистки всех трубок теплообменника через все трубки должно проходить примерно одинаковое количество элементов как в верхних, так и в средних и в

нижних рядах. Так как теплоноситель является одновременно и носителем очищающих элементов, то плотность очищающих элементов должна быть привязана к нему. На практике оказалось, что для равномерной очистки теплообменника плотность одной группы элементов должна быть в пределах 0,8-0,85 %, второй - 90-95 %, третьей - 100-105 % от плотности теплоносителя. В соответствии с соотношениями плотностей упругие очищающие тела распределяются по трубкам по высоте трубной доски. Группа, содержащая тела наименьшей плотности, распределяется по верхним рядам трубок, группа с телами наибольшей плотности - по нижним рядам трубок, группа средней плотности - по средним рядам.

Количество элементов в разных группах зависит от формы теплообменника, которая определяет число трубок на разной высоте теплообменника, так, при прямоугольном профиле количество элементов разных групп должно быть примерно одинаковым, а при профиле в виде круга: в первой и третьей группах - около 18-23 %, а во второй - около 60-64 % от их общего числа.

Оказалось, что если очищающие элементы имеют размеры 0,5-0,9 диаметра трубок теплообменника, то они внутри трубки движутся по сложной траектории, периодически ударяя по ее внутренней поверхности. При этом, если элемент мягкий, например, состоит из поролона или губчатой резины, то он не удаляет отложения. Но если элементы имеют прочное покрытие, то при ударе поверхность взаимодействия элемента с трубкой минимальна, так как происходит только в точке соприкосновения, то есть в первом приближении стремится к нулю, отсюда давление при ударе огромно и примерно в 30-50 раз больше давления теплоносителя, что вполне достаточно для разрушения отложения. И такие очищающие элементы удаляют отложения.

Это происходит потому, что вначале после входа в трубку очищающий элемент вышеуказанных размеров под действием потока теплоносителя без вращения начинает двигаться вдоль трубки со скоростью w . Затем появляется также радиальная скорость в направлении к стенке (первоначальный импульс происходит из-за действия гравитационных сил), а потом под действием эффекта разряжения из-за возникновения "Бернуллиевых сил". Сила, толкающая шарик к противоположной стенке с радиальной скоростью s , подобна подъемной силе крыла самолета - сила возникает из-за того, что в узком сечении скорость больше, следовательно, по закону сохранения энергии, давление меньше. Далее, для упрощения исследования, используем подход к вихревому движению, изложенный в [4, 5, 6, 7].

При взаимодействии элемента со стенкой в точке удара элемент в радиальном направлении останавливается (скорость $s = 0$) и теряет $2/7$ доли импульса. Так как в осевом направлении элемент продолжает движение, то он приобретает угловую скорость ω_0 :

$$\Delta w = 2/7 w;$$

$\omega_0 \cdot d = 10/7 \cdot w$, где d - эквивалентный диаметр элемента, ω_0 - угловая скорость вращения элемента вокруг своей оси.

Вследствие относительно тесного расположения элементов в трубке энергия его вращательного движения $J \cdot \omega_0^2 / 2$, где $J = m \cdot d^2 / 10$ - момент инерции элемента массой m , передается слою отложений на стенке в нормальном и касательном направлениях. Если форма элемента не шар, то берется средняя (наиболее вероятная по всем из декартовых координат) энергия. Касательное напряжение t в единицу времени определяется выражением:

$t = 0,77 \cdot \rho_1 c^2 \cdot \tau \cdot \eta$, где ρ_1 - средняя плотность материала элемента, τ - относительная объемная концентрация элементов (нормированная на единицу объема теплоносителя) в очищаемой трубке ($\tau \approx 0,05-0,1$).

Здесь $\eta = 1 - (\tau / \tau_0)^{1/3}$, где τ_0 - максимальная относительная концентрация элементов в трубке ($\tau_0 = 0,6$).

После первого столкновения со стенкой очищающий элемент уже движется вдоль трубки теплообменника, вращаясь, и результатом следующего удара очищающего эле-

ВУ 14814 С1 2011.10.30

мента о стенку будет не только потеря нормальной и касательной составляющих импульса, но и приобретение элементом противоположно направленной угловой скорости ω_1 . Вследствие чего к силам, действующим на элемент, прибавляется поперечная сила Магнуса.

Величину этой силы можно определить следующим путем. Элемент со средним диаметром d вращается с угловой скоростью ω_1 и обтекается потоком теплоносителя, имеющего скорость w . Вокруг движущегося элемента создается циркуляция Γ , равная:

$\Gamma = 2\pi\omega_1(d^2/4 - z^2)$, где z - декартова координата, соответствующая высоте в декартовых координатах.

Поперечная сила, действующая на элемент, вычисляется по формуле Жуковского:

$dF = \rho w \Gamma dz$, где $\rho w \Gamma$ - сила на единицу длины диаметра.

Для полной силы F найдем:

$$F = 2\rho w \int_0^{d/2} \Gamma dz = \frac{1}{3}\pi d^3 / 8\rho\omega_1 w = 2m \frac{\rho}{\rho_1} \omega_1 w, \text{ где } m - \text{масса элемента.}$$

Под действием силы Магнуса элемент осуществляет скачкообразное движение от стенки до стенки по кривой, называемой циклоидой, и увеличивает ударное взаимодействие со слоем отложений.

Таким образом, элементы внутри трубы движутся по сложной траектории, периодически касаясь разных точек стенок, и при движении по трубкам периодически ударяют по внутренней поверхности стенок трубок, что приводит к усталостному разрушению отложений, а также создают силу, приложенную к отложению и направленную вдоль оси трубки (или в направлении движения теплоносителя), разрушающую и сдирающую отложения. Благодаря их твердому покрытию удар по отложениям производится массой очищающих элементов только в точке соприкосновения на очень небольшой площади, поэтому развиваемые от удара давления значительно превышают давление теплоносителя. Твердое покрытие очищающего элемента может быть организовано следующим образом: пустотелый металлический шар с различной толщиной оболочки, гладкий или с выступающими частями, шипами, или же на само тело упругих очищающих элементов, или же на их грани наносится какая-то прочная конструкция, например торчащая из него сетка (металлическая или полимерная), части металлической сферы, броневые скорлупки - небольшие кусочки сферы, твердые вкрапления, могущие выступать из тела, например шипы, а также бандаж или другие устройства, имеющие большую твердость.

Предлагаемый способ очистки трубчатых теплообменников может быть реализован в установке, изображенной на фигуре.

Установка включает трубопровод 1 подвода теплоносителя, трубчатый теплообменник 2 с трубными досками 3, устройство 4 для отделения очищающих элементов 5 от теплоносителя, струйный насос 6 для транспортировки очищающих элементов 5, камеру 7 загрузки очищающих элементов 5, запорные задвижки 8 и 9. В теплообменнике 2 расположены трубки 10, которые снаружи омываются паром, а внутри по ним проходит теплоноситель - техническая вода.

Установка работает следующим образом. В камеру 7 загрузки загружают очищающие элементы 5, состоящие из трех групп, различающиеся по количеству и плотности очищающих элементов. Загрузку камеры 7 ведут при закрытых задвижках 8 и 9. Подают воду (активный поток) на сопло струйного насоса 6 и открывают задвижки 8 и 9. Очищающие элементы 5 увлекаются потоком воды и вводятся в основной поток теплоносителя перед входом в теплообменник 2. На входе в трубки 10 теплообменника 2 очищающие элементы 5 в соответствии с их плотностью и количеством равномерно распределяются по высоте трубной доски 3 и, проходя внутри трубок 10 теплообменника 2, очищают их внутреннюю поверхность от загрязнений. На выходе из теплообменника 2 в устройстве 4 для отделения очищающих элементов от теплоносителя очищающие элементы 5 отделяют от теплоноси-

теля и с помощью струйного насоса б транспортируют и вновь вводят их в поток теплоносителя перед входом в теплообменник 2. Пар, проходя через теплообменник 2, конденсируется, конденсат удаляется по трубопроводу.

Пример расчета

Задача описания всех фаз движения очищающего элемента даже в самой простой форме - в виде шара в трубке - слишком сложна и неопределенна из-за возможности многочисленных вариантов, связанных с различием диаметров трубок и шаров, качеством их поверхностей, вязкостью жидкости, плотностей материала шаров и жидкости, дефектов формы шаров при их износе и изменением внутреннего профиля трубки по длине и периметру из-за неравномерности отложений на ее внутренней поверхности и т.д. К тому же решение задачи осложняется еще и тем, что перепад давления между входной и выходной трубными досками конденсатора, общий для многочисленных трубок конденсатора, а в этих трубках из-за различных взаимодействий с ними различных шаров возникают во времени различные сопротивления, влияющие нелинейно в обратной степени на расходы и скорости теплоносителей по трубкам, а сам шар в зависимости от условий может перекрывать сечение трубки, может катиться по ее стенке без проскальзывания или же "прыгать" внутри ее по сложной траектории. Из-за пружинящих свойств шара и стенки трубки часть кинетической энергии взаимодействия сохраняется и возвращается шару, что еще более усложняет задачу определения воздействия шара на отложения.

Поэтому рассмотрим один наиболее общий и простой вариант: шар ударился о стенку и на мгновение остановился в радиальном направлении, как бы "прилип" к стенке, затем, так как вдоль трубки движение продолжается, шар начнет поворачиваться, чтобы катиться по стенке трубки. Момент инерции шара равен: $J = 0,4mr^2$, где $m = 4/3\pi r^3$. Учитывая вышеизложенное, расчеты сделаем для двух временных случаев: 1) сразу после удара и 2) через некоторый промежуток времени, когда шар уже оторвался от стенки и начал, вращаясь, двигаться в потоке жидкости.

1. После удара шара о стенку трубки его скорость в точке соприкосновения равна нулю ($w_1 = 0$), а на другой по диаметру стороне скорость поверхности шара соответствует скорости невозмущенного потока ($w_2 = w_0$). Все это верно только в первый момент после удара шара. В центре шара скорость равна $w_3 = 1/2w_0$. Ее можно принять за среднюю вдоль оси скорость шара. При расчете учтем, что часть $(r/R)^2$ жидкости движется вслед за шаром, т.е. со средней скоростью $w_4 = 1/2w_0$, а часть $(R^2-r^2)/R^2$ движется в зазоре между шаром и стенкой (ее скорость обозначим w_5). Здесь r - радиус шара, а R - радиус трубки. С учетом закона неразрывности найдем скорость w_5 жидкости в зазоре между стенкой трубы и шаром:

$$w_{\text{в зазоре}} = w_5 = w_0 \cdot [1 - 1/2(r/R)^2] / [1 - (r/R)^2].$$

Используя первый закон термодинамики в виде уравнения Бернулли, учитывая, что плотность жидкости остается постоянной, получим перепад давлений (ΔP), толкающий шар к противоположной стенке (соответствует подъемной силе крыла самолета):

$$P_1 + w_4^2/2 = P_2 + w_5^2/2,$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 1/2 \cdot (w_5^2 - w_4^2) = 1/2 \cdot w_0^2 \cdot \{ [1 - 1/2(r/R)^2]^2 / [1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

Отсюда сила F , действующая на шар, равна:

$$F = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta P = \pi \cdot r^2 \cdot 1/2 \cdot w_0^2 \cdot \{ [1 - 1/2(r/R)^2]^2 / [1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

Так как при ударе шара стенка воспринимает это усилие на небольшой площади соприкосновения, величина которой составляет небольшую долю k от площади шара (от 0,01 до 0,2, в зависимости от плотности отложений и их толщины, соотношения и геометрических размеров шара и трубки), то развиваемое при этом давление составляет значительную величину:

$$P = F/k\pi r^2 = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta P / k\pi r^2 = \Delta P/k = 1/2 \cdot 1/k \cdot w_0^2 \cdot \{ [1 - 1/2(r/R)^2]^2 / [1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

В относительных единицах (нормируя на давление P_0 невозмущенного потока жидкости) имеем:

ВУ 14814 С1 2011.10.30

$$P/P_0 = 1/P_0 \cdot 1/2 \cdot 1/k \cdot w_0^2 \cdot \{ [1 - 1/2(r/R)^2]^2 / [1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

Так как шар начинает вращаться, то со стороны зазора его поверхность вращается по ходу движения жидкости, ускоряя ее, а вблизи точки его последующего отрыва - в противоположную, тормозя поток жидкости. При торможении потока часть его полной энергии, а именно ее кинетическая составляющая, переходит в потенциальную, то есть энергию давления. С противоположной стороны шара вращение шара уменьшает потенциальную составляющую общей энергии, проявляющуюся в виде давления. Благодаря этому в шаре поддерживается первоначально полученный им импульс из-за перепада давлений до его встречи с противоположной стенкой.

Рассмотрим поведение шара в трубках конденсатора турбоустановки Т-250/300-240.

Скорость технической воды в реальных конденсаторах составляет 1,5-2,5 м/с. Диаметр (внутренний) латунных трубок около 22 мм. Давление жидкости около 2-3 атм.

Поэтому при скорости воды, равной 1,5 м/с, ее давлении 2 атм, величине $k = 0,05$ и $r/R = 0,9$ получаем: $P/P_0 = 32,4$. При скорости невозмущенного потока жидкости $w_0 = 2,0$ м/с, ее давлении 3 атм, величине $k = 0,1$ и $r/R = 0,95$, получаем: $P/P_0 = 55$. Таким образом, давление, производимое шаром при ударе, в 32,4-55 раз больше давления теплоносителя.

2. Шар оторвался от стенки.

Оценим эффект вращения шара, используя уравнение Бернулли:

$P_1 + w_1^2/2 = P_2 + w_2^2/2$, так как $w_1 = 0$, а $w_2 = 2w$, получаем:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 1/2 \cdot 4w^2 = 2w^2.$$

Отсюда сила F , действующая на шар, равна $F = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta P = \pi \cdot r^2 \cdot 2w^2$, а развиваемое при этом давление составляет следующую величину:

$$P = F/k\pi r^2 = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta P/k\pi r^2 = \Delta P/k = 2w^2 \cdot 1/k.$$

В относительных единицах (нормируя на давление P_0 невозмущенного потока жидкости) имеем: $P/P_0 = 2w_0^2 \cdot 1/k \cdot 1/P_0$.

При $w = 2$ м/с, $P_0 = 2$ атм, $k = 0,1$, получаем: $P/P_0 = 40$. То есть давление, производимое при ударе шара, в 40 раз больше давления теплоносителя.

Таким образом, используя разные методики для разных случаев движения шара, получаем близкие друг к другу значения величин воздействия шара на отложения внутри трубки.

Исследования показали, что размеры очищающих элементов с твердым покрытием, составляющие 0,5-0,9 от диаметра трубок теплообменников, являются оптимальными для очищающего эффекта, т.к. элементы меньшего чем 0,5 диаметра имеют слишком малую массу (она зависит от диаметра в кубе - $\frac{1}{6}\pi d^3$), отсюда давление при ударе развивается

меньше требуемого для очистки, а при диаметре, большем 0,9, площадь соприкосновения шара и внутренней поверхности трубки достаточно велика, поэтому мало давление на отложение при ударе, к тому же скорость удара меньше требуемой для развития нужного воздействия (она определяется сопротивлением торможения шара жидкостью при его движении к противоположной стенке и зависит от площади его поперечного сечения, т.е. $\frac{\pi d^2}{4}$). В результате не обеспечивается нужное для очистки воздействие на отложения.

Также оказалось, что вышеуказанного давления (в 30-50 раз превышающего давление проходящей через трубки среды - носителя очищающих элементов), периодически действующего на внутренние поверхности стенок, достаточно для предотвращения образования отложений, или, если они были образованы ранее, для их разрушения и удаления. При меньшем давлении разрушаются не все отложения, а при большем могут быть повреждены внутренняя поверхность трубок.

Предложенное изобретение обеспечивает повышение качества очистки внутренней поверхности трубок теплообменника. Это понижает давление в конденсаторе, что приво-

ВУ 14814 С1 2011.10.30

дит к увеличению теплоперепада, сработанного в турбине. Так, например, если при температуре охлаждающей воды в 20 °С без очистки отложений давление в конденсаторе составляло 0,069 атм, а при очистке стало 0,064 атм (для первого и второго конденсаторов по ходу охлаждающей воды), то увеличение сработанного теплоперепада (т.е. энергии, отданной турбине), составит 4,7 кДж/кг. В году (в межтопительный период) такие турбины работают на конденсатор примерно 0,5 года. Расход острого пара при этом порядка 272 кг/с. То есть изменение мощности составляет 1,28 МВт. Отсюда за 0,5 года экономится $1,28 \cdot 365 / 2 \cdot 24 \cdot 0,324 = 1,816,5$ т у.т. При цене 1 т у.т. в 100 долл. это составит 181,650 долл. Учитывая уменьшение простоев энергоблока из-за очистки конденсатора и стоимость самой очистки, экономический эффект от внедрения изобретения для очистки конденсатора одной турбины Т-250/300-240 на МТЭЦ-4 составит около 250 тыс. долл. в год. Кроме того, не нужно останавливать энергоустановку для очередной очистки конденсатора, чем экономятся материальные и трудовые ресурсы, повышается коэффициент использования установленной мощности, что позволяет увеличить выработку электроэнергии.

Таким образом, достигнуто улучшение очистки внутренней поверхности трубок теплообменников, что повысило эффективность и надежность работы всей энергоустановки при существенном сокращении топливных, материальных и трудовых затрат, то есть задача изобретения выполнена.

Источники информации:

1. А.с. СССР 628965, МПК В 08В 9/00 // БИ. - № 25. - 1977.
2. А.с. СССР 691108, МПК F 28G 1/12 // БИ. - № 31. - 1977.
3. А.с. СССР 1051367, МПК F 28G 1/12 // БИ. - № 40. - 1983.
4. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Теоретическая механика. Часть 3. Динамика несвободной системы и теория колебаний. - Москва, 1933.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Изд. пятое, перераб. - Москва, 1978. - С. 370, 408, 709-714.
6. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. - Новосибирск: Наука, 1982. - 366 с.
7. Гольдштик М.А. Вихревые потоки и явления. Препринт 210-89. - Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1989. - 69 с.