

ГЛАВА 26

АППАРАТЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

26.1. Общие сведения

К аппаратам высокого давления (АВД) условно относят аппараты, работающие на внутреннем давлении в диапазоне от 10 МПа до 130 МПа. Данное оборудование используется для проведения химических и нефтехимических процессов в производстве спиртов (этанол, метанол, бутиловые и высшие жирные спирты), минеральных удобрений (аммиак, карбамид), полиэтилена, искусственных кристаллов и т.п.

Конструктивно аппараты высокого давления подразделяются на цельнокованые, кованосварные, штампованные и вальцованные, многослойные с концентрическим расположением относительно тонких слоев, многослойные с концентрическим расположением относительно толстых слоев, витые из профильной ленты, рулонированные, спирально-рулонированные, армированные проволокой.

Цельнокованые АВД (рис. 26.1) имеют монолитный корпус, изготовленный из одной поковки. Это обстоятельство определяет их относительно небольшие размеры (внутренний диаметр 600 – 1200 мм, длина до 18 м).

Их чаще всего применяют при давлении более 32 МПа и высокой температуре, особенно при наружном обогреве корпуса.

Преимущество таких АВД — отсутствие сварных швов, являющихся потенциальным источником дефектов и снижающих надежность корпуса.

Основные недостатки — низкий коэффициент полезного использования металла (отношение массы готового изделия к массе поковки и слитка), ограниченные размеры, необходимость наличия при изготовлении специального литейного оборудования, уникального кузнечно-прессового и станочного, значительный объем механической обработки.

Кованосварные АВД (рис. 26.2) имеют корпус из нескольких механически обработанных кованых частей (обечайки, днища, фланцы, горловины), скрепленных между собой кольцевыми сварными швами. Применение нескольких поковок для изготовления одного корпуса значительно расширяет возможности изготовления кованосварных аппаратов по сравнению с цельноковаными, особенно по габаритам, при этом несколько снижаются потери металла при изготовлении и стоимость АВД.

Штампосварные и вальцованные АВД (рис. 26.3 и 26.4) имеют корпус, выполненный из нескольких штампованных или вальцованных обечаек (или полуобечаек), соединенных между собой продольными и кольцевыми сварными швами, а концевые

детали (днища, фланцы и горловины) выполняются отдельно из поковок или штамповок.

Такие аппараты более экономичны по сравнению с цельноковаными и кованосварными, их можно изготавливать значительно большего диаметра.

Существенный недостаток, снижающий надежность таких аппаратов, — наличие продольных сварных швов, выполняемых обычно электрошлаковой сваркой или автоматической под слоем флюса.

Многослойные АВД с концентрическим расположением относительно тонких слоев (способ изготовления A.O. Smith) — выполняют из нескольких обечаек (рис. 26.5), состоящих из относительно большого числа слоев из тонкого листа (4 – 6 мм), обтягивающих с натягом относительно толстую центральную обечайку (16 – 24 мм), выполненную из материала, имеющего коррозионную стойкость против соответствующей рабочей среды.

Обечайки соединены между собой и с концевыми элементами корпуса кольцевыми сварными швами.

Концевые элементы корпуса выполняют из поковок или штамповок.

Для улучшения работоспособности многослойного корпуса и повышения надежности конструкции в цилиндрической стенке возле сварных кольцевых швов просверливаются дренажные (контрольные) отверстия на глубину до центральной обечайки. Через них удаляются газы (водород), дифундирующие через центральную обечайку.

Преимущества этих сосудов — возможность изготовления крупногабаритных аппаратов, низкая удельная металлоемкость и стоимость по сравнению с рассмотренными. Кроме того, эта конструкция сравнительно просто позволяет обеспечить коррозионную защиту внутренней поверхности корпуса за счет упомянутой центральной обечайки.

Из недостатков следует отметить относительно высокую трудоемкость из-за последовательной сборки разноразмерных обечаек по слоям, большое число продольных сварных швов (в каждом слое от 1 до 3-х), а также массивные кольцевые швы, являющиеся потенциальным источником дефектов.

Многослойные АВД с концентрическим расположением относительно толстых слоев (Multiwall) — выполняют последовательной прессовой посадкой (напрессовкой) серии сварных цилиндрических обечаек из толстого листа (25 – 60 мм) на центральную обечайку из металла, имеющего коррозионную стойкость против соответствующей рабочей среды (рис. 26.6).

Далее обечайки и концевые детали свариваются аналогично упомянутому в конструкции A.O. Smith.

Преимущества и недостатки АВД типа Multiwall аналогичны конструкции A.O. Smith.

АВД, витые из профильной ленты (способ намотки Ширенбека), выполняются из специального проката узкой стальной высокопрочной калиброванной профильной ленты, навитой на центральную обечайку с проточкой наружной поверхности по винтовой линии под профиль ленты (рис. 26.7). Для увеличения плотности навивки ленту предварительно нагревают и наматывают (укладывают) с натягом.

Оевые силы в корпусе передаются за счет сцепления слоев по выступам лент. Концевые детали (фланцы) выполняют дополнительной навивкой ленты или насадкой кованых деталей.

К преимуществам витых АВД относится относительно высокий коэффициент полезного использования металла и уменьшенная масса за счет применения высокопрочной профильной ленты.

К недостаткам витых АВД относится сложность технологии изготовления стальной калиброванной профильной ленты, а также проточенной центральной обечайки, невозможность применения боковых штуцеров, а также относительно высокий уровень осевых напряжений в кольцевых швах центральной обечайки. Витые корпуса таких сосудов невозможно ремонтировать.

Рулонированные АВД (рис. 26.8) имеют корпус из одной или нескольких многослойных рулонированных обечаек, соединенных между собой и с концевыми элементами корпуса кольцевыми сварными швами. Концевые элементы выполняются из поковок или штамповок. Многослойная рулонированная обечайка состоит из центральной обечайки толщиной 16 – 24 мм и намотанной на нее до необходимой толщины по спирали Архимеда рулонной полосы шириной 1400 – 1800 мм, толщиной 4 – 6 мм. Для уменьшения количества массивных кольцевых швов рулонные полосы могут свариваться между собой продольным швом с образованием так называемого «полотнища» удвоенной ширины, которое также наматывается на центральную обечайку. Снаружи на намотанную рулонную обечайку надевается защитный кожух толщиной 8 – 12 мм.

Преимущества рулонированных сосудов значительно АВД типа A.O. Smith, по показателям стоимости, технологичности изготовления (простота механизации процесса навивки рулона) и удельной металлоемкости (меньшие отходы тонкого листа) значительно лучше.

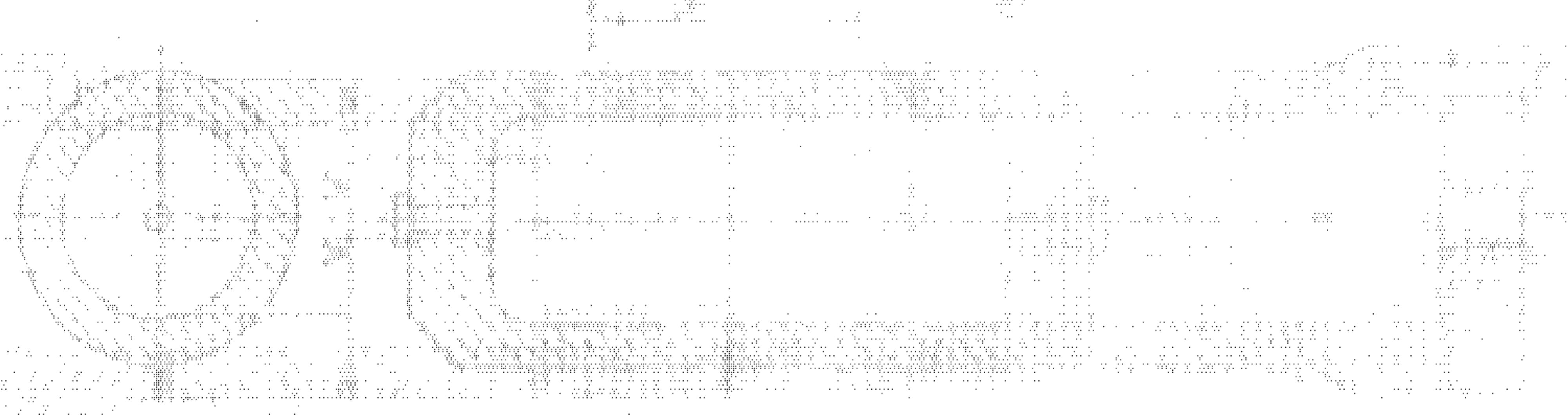
Сpirально-рулонные АВД (рис. 26.9) — это аппараты, цилиндрическая часть корпуса которых получается навивкой по спирали под углом к оси сосуда одной или нескольких полос. Остов такого АВД состоит из центральной обечайки на всю длину АВД с прикрепленными к ней концевыми элементами. Навиваемые на центральную обечайку полосы закрепляются на концевых деталях сварными швами. Каждый последующий слой навивается в противоположную сторону по отношению к предыдущему.

Для обеспечения прочности в осевом направлении часть слоев сваривается во кромкам винтовой спирали. Поверх навивки надевается наружный кожух или сам наружный слой проверяется сплошным швом по всей винтовой линии.

Преимущества спирально-рулонных АВД аналогичны всем многослойным сосудам. Кроме этого, у них отсутствуют массивные кольцевые сварные швы на всю толщину многослойной обечайки и уменьшен расход металла при изготовлении, поэтому по технико-экономическим показателям эта конструкция превосходит АВД других исполнений, в том числе и рулонированные.

АВД, армированные проволокой (рис. 26.10) — это аппараты, корпус которых дополнительно укрепляется намоткой слоев высокопрочной проволоки в виде отдельного бандажа на цилиндрической части или путем сплошной намотки на весь корпус до необходимой толщины. Навивка производится по так называемым «геодезическим линиям».

К преимуществам такой конструкции относится низкая металлоемкость вследствие применения весьма высокопрочной проволоки и, соответственно, снижение толщины стенки. К недостаткам следует отнести сложность конструктивного оформления люков и штуцеров, недостаточную коррозионную стойкость намотанных слоев от атмосферной коррозии, если эта намотка не защищена каким-либо межслойным наполнителем, а также сложность намотки и переплетения между собой пучков проволоки.



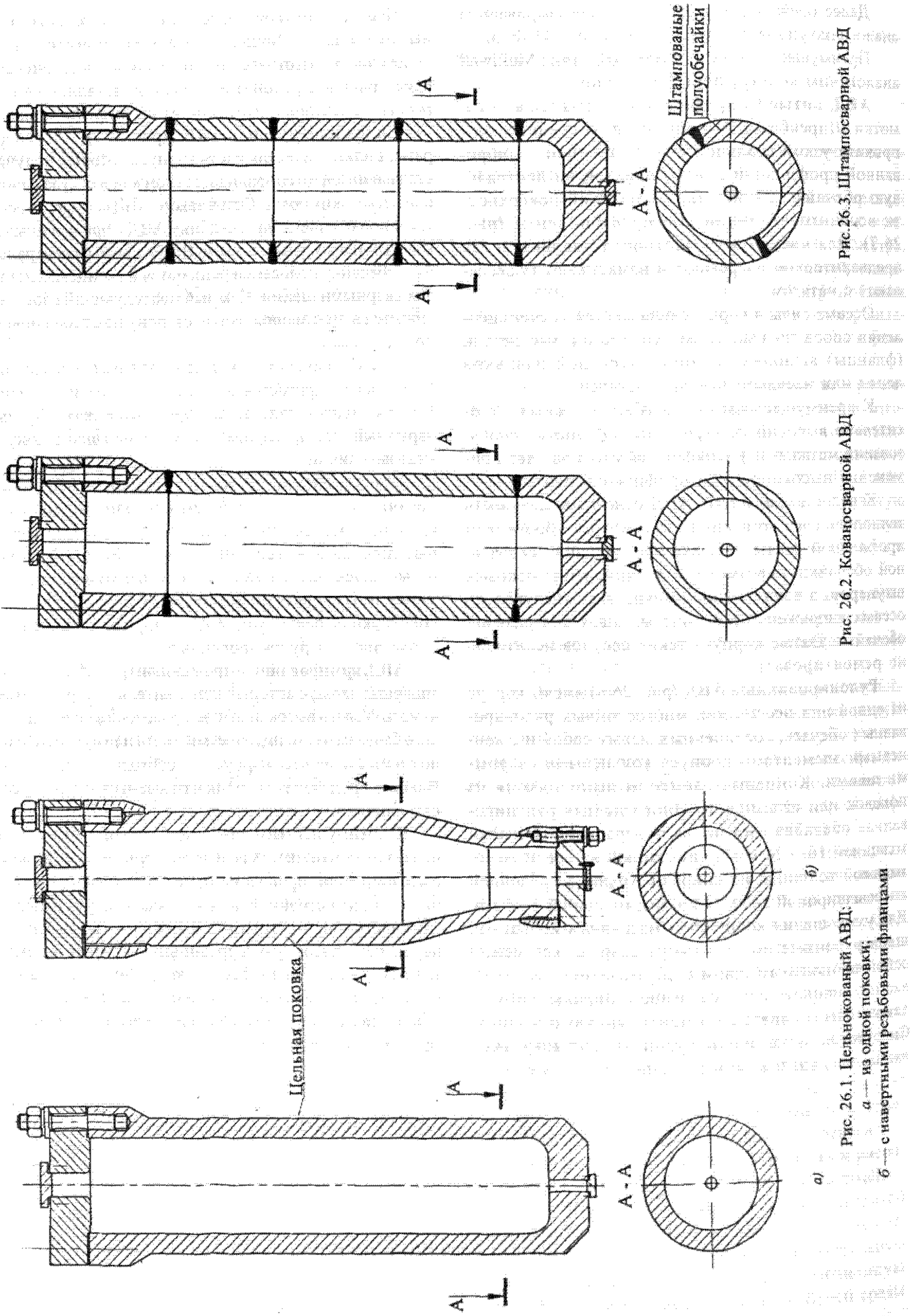


Рис. 26.6. Многослойный АВД с концентрическими расположениями слоев (Multicell)

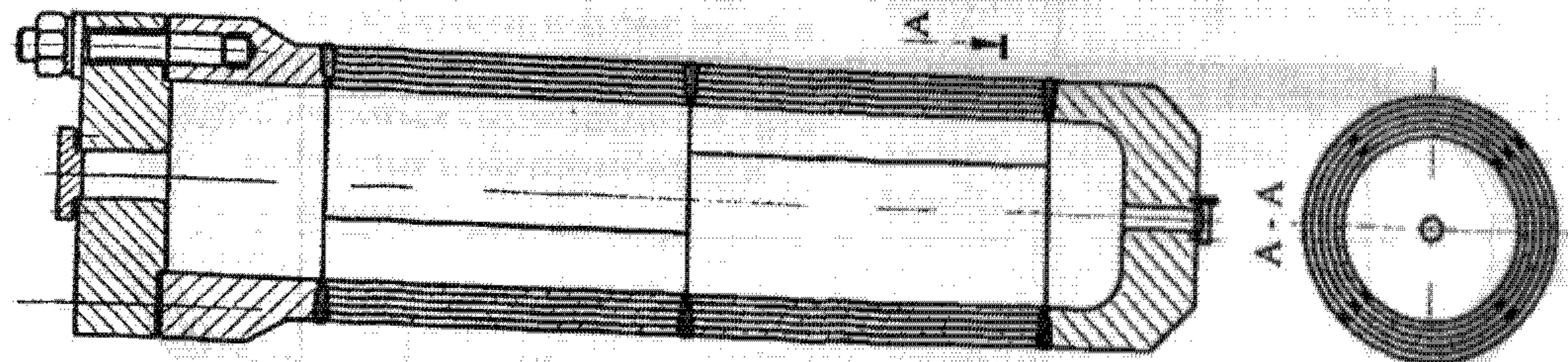


Рис. 26.5. Многослойный аппарат с концентрическим расположением слоев (A.O. Smith)

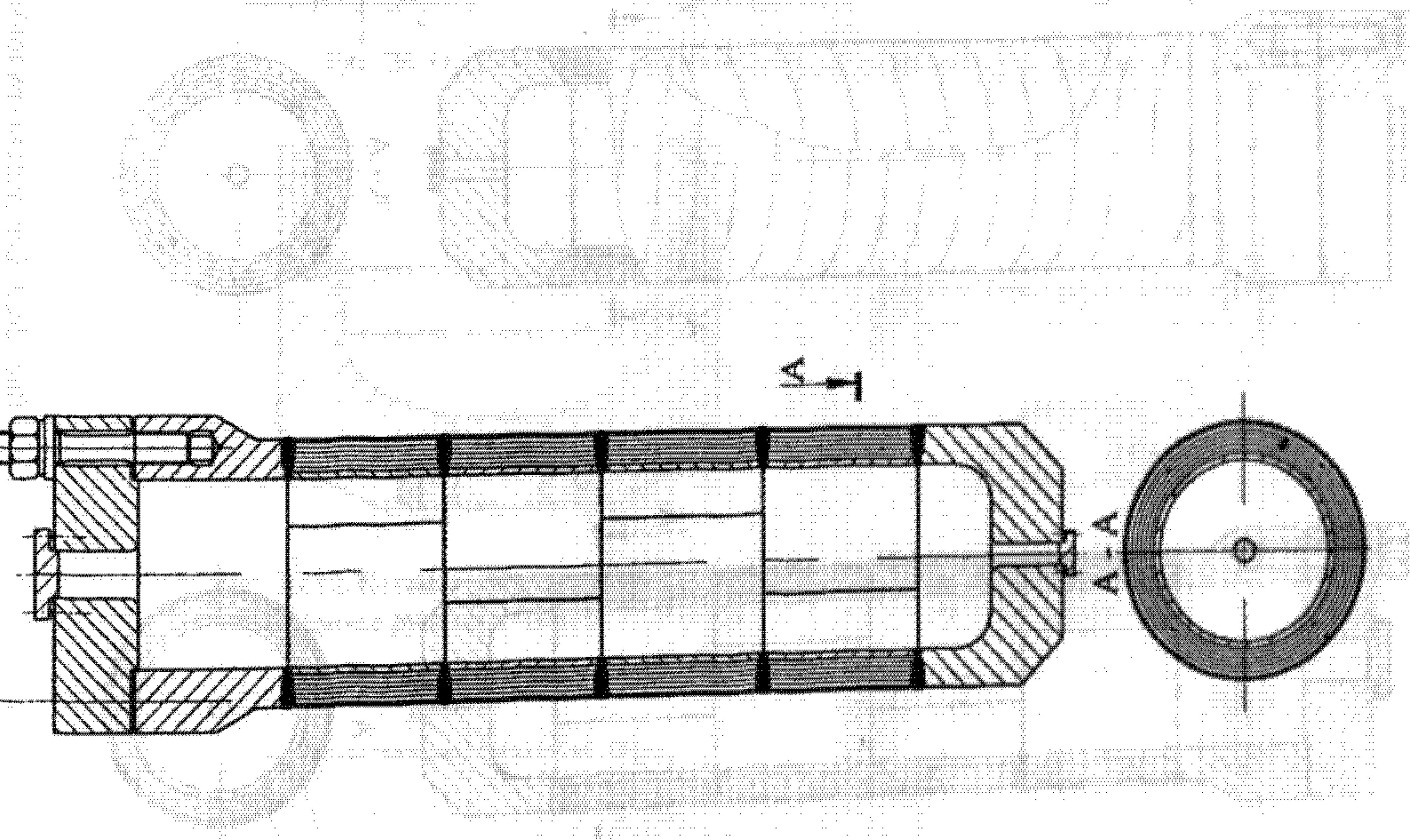
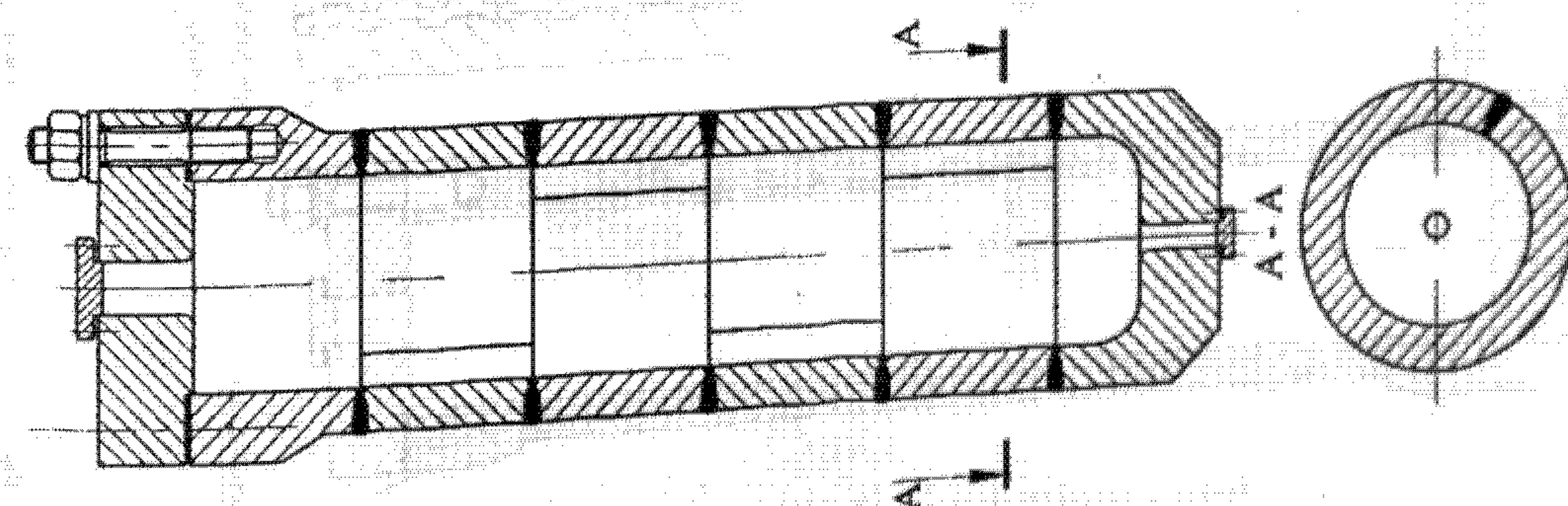


Рис. 26.4. Водянометрический АВД



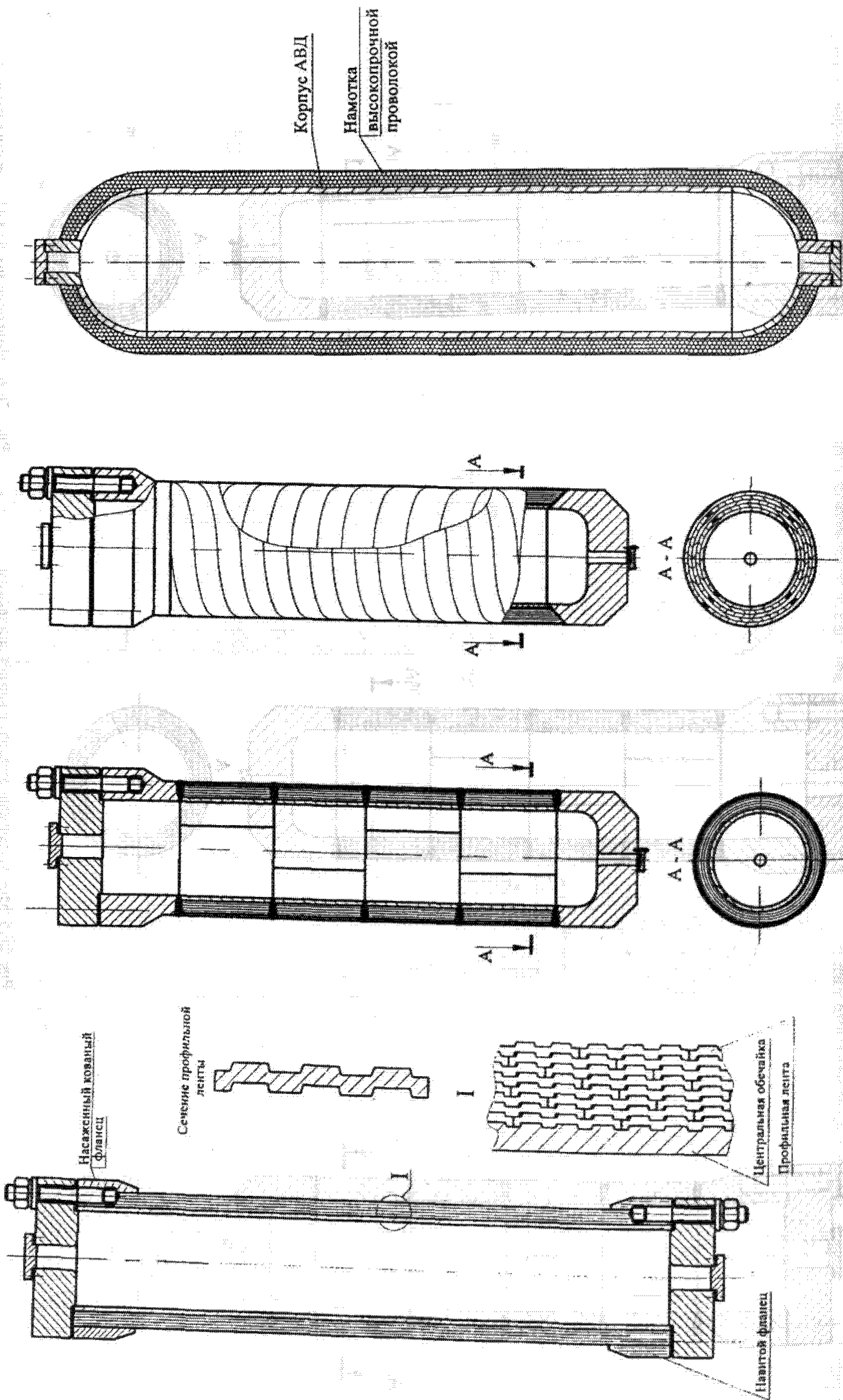


Рис. 26.10. АВД, армированный проволокой

Рис. 26.9. Спирально-рулонный
АВД

Рис. 26.8. Рулонированный АВД

Рис. 26.7. Витой АВД из профильной ленты

26.2. Конструкции основных элементов АВД

26.2.2. Днища

В зависимости от размеров АВД и их рабочих параметров, технологических возможностей изготовителей днища могут иметь самую различную форму, но должны соответствовать требованиям Правил Госгортехнадзора России и ограничиваться следующими конструкциями, приваренными встык к обечайкам корпуса:

плоские отбортованные;

эллиптические;

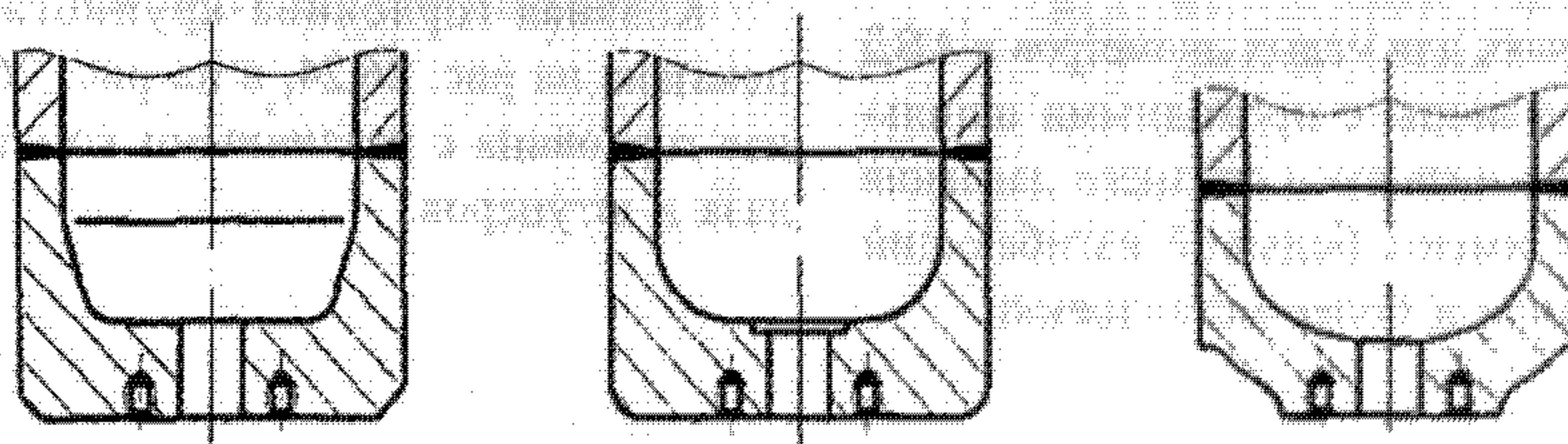


Рис. 26.11. Кованые плоские и слабовыпуклые днища с отбортовой

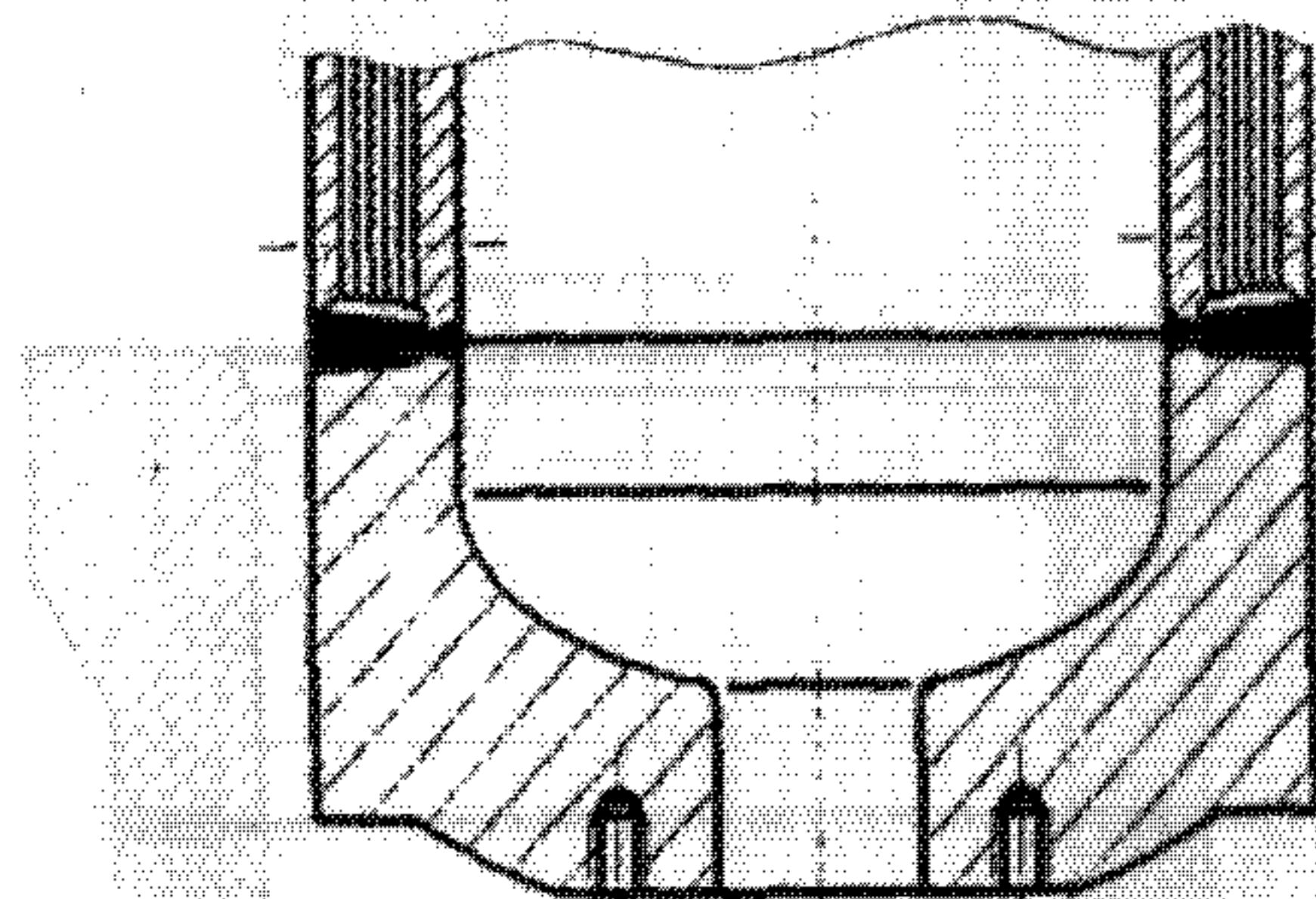


Рис. 26.12. Кованое эллиптическое днище, стыкуемое с рулонированной обечайкой

полусферические.

Конструктивное оформление плоских кованных днищ показано на рис. 26.11; эллиптических — на рис. 26.12.

Эллиптические и полусферические днища, привариваемые к монолитным обечайкам, показаны на рис. 22.13 и 26.14.

Конструкции полусферических днищ, привариваемых к многослойной обечайке, приведены на рис. 26.15 и 26.16.

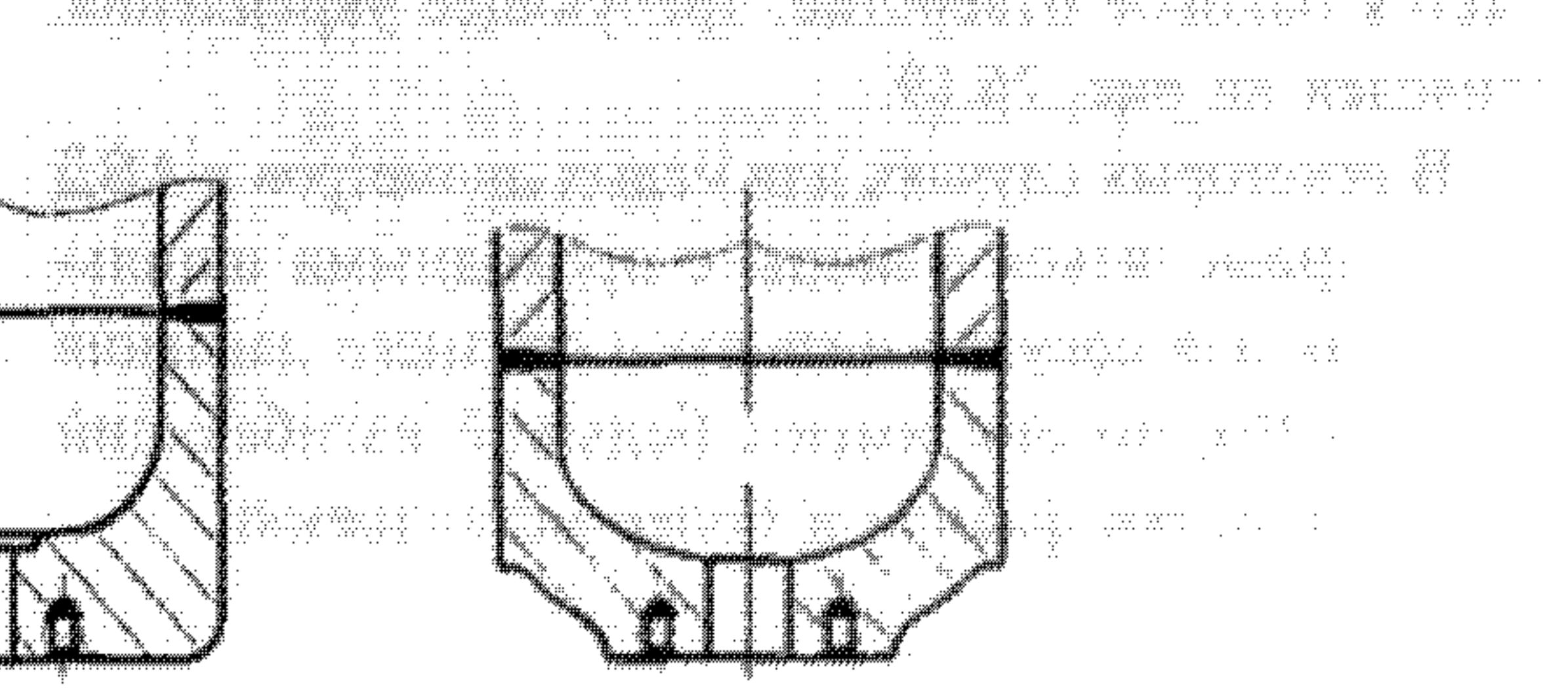


Рис. 26.13. Эллиптическое штампованные днище

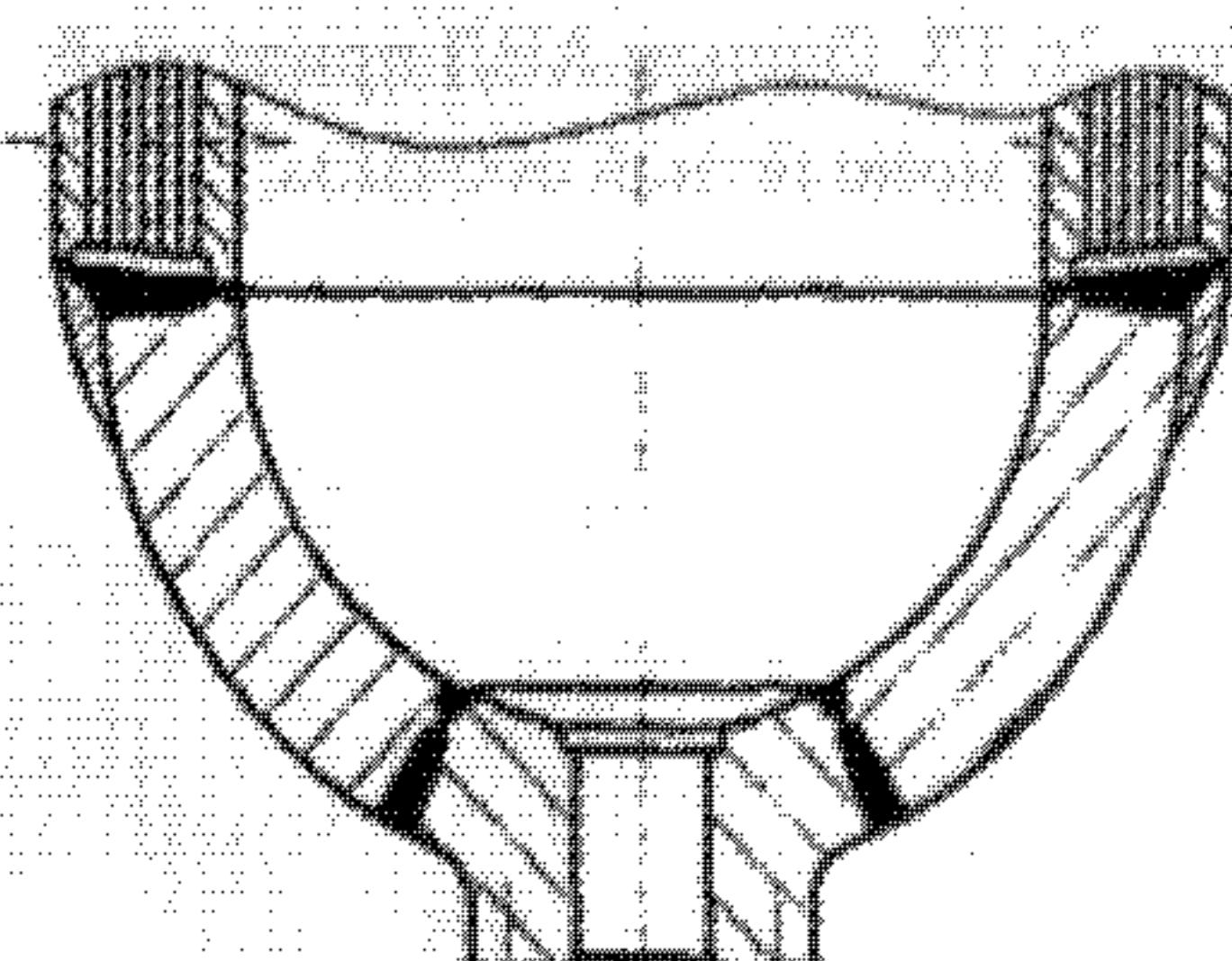


Рис. 26.14. Полусферическое штампованием днище

Рис. 26.15. Полусферическое днище с наплавкой переходной части к многослойному цилиндру

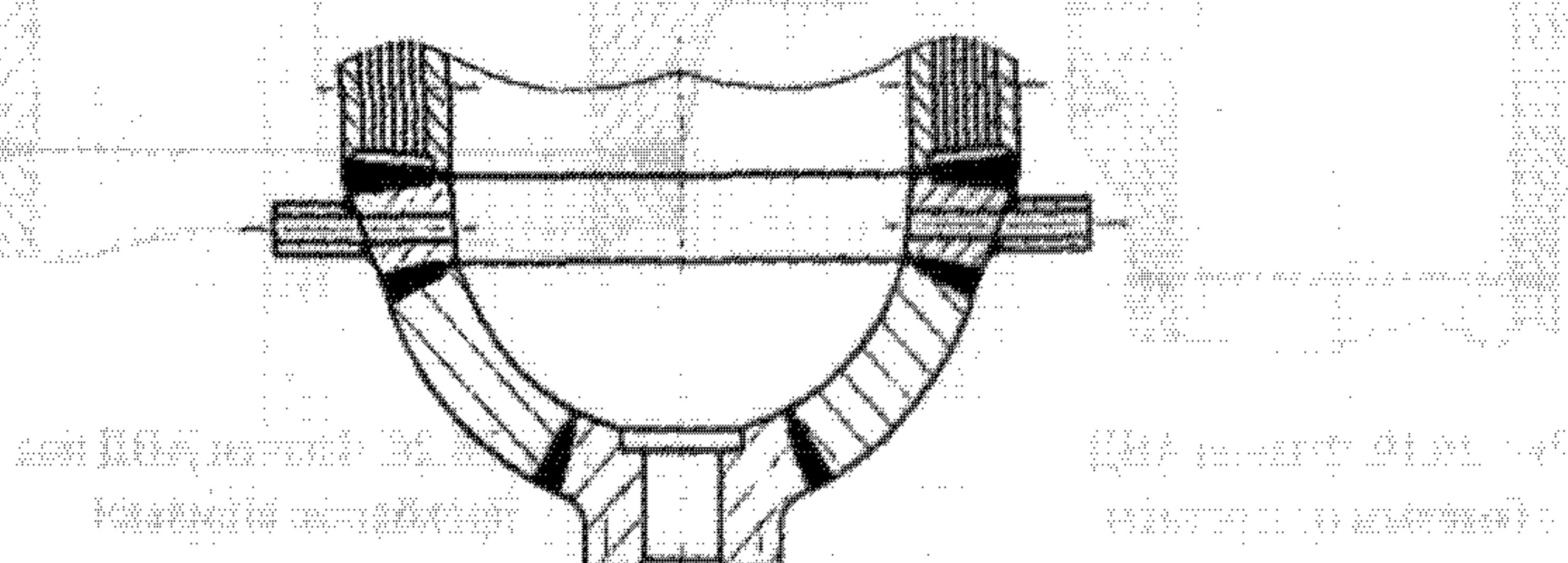


Рис. 26.16. Полусферическое днище с кованой переходной вставкой к многослойному цилиндру

26.2.3. Фланцы и горловины

Конструкции типичных кованых фланцев АВД, приваренных к монолитной и многослойной обечайкам, показаны на рис. 26.17 и 26.18.

Такие фланцы с ввертными крепежными шпильками компактны, обеспечивают минимальный изгибающий момент в конструкции из-за расположения шпилек по минимально возможному диаметру и экономичны по металлоемкости.

Пример конструкции фланца, в котором размещается боковое отверстие, требующее укрепления, приведен на рис. 26.19.

В некоторых случаях для малых диаметров в АВД могут применяться фланцы с проходными шпильками, как для сосудов низкого и среднего давления (рис. 26.20), но они имеют большой изгибающий момент тарелки фланца и более металлоемки.

В тех случаях, когда в АВД не требуется разъем корпуса по всему диаметру для установки и извлечения внутренней насадки или других устройств, применяются горловины, которые обеспечивают доступ во внутреннюю полость АВД только для освидетельствования, монтажа по частям каких-либо внутренних устройств, засыпки и выгрузки катализатора и т.п.

Конструкция кованой горловины представлена на рис. 26.21, вариант подобной горловины с боковым отверстием — на рис. 25.22.

Широко применяются горловины в штампованных днищах — рис. 26.23.

Кованая горловина крупногабаритного АВД показана на рис. 26.24, а на рис. 26.25 — аналогичная горловина с различными конструкциями люка-лаза и штуцеров.

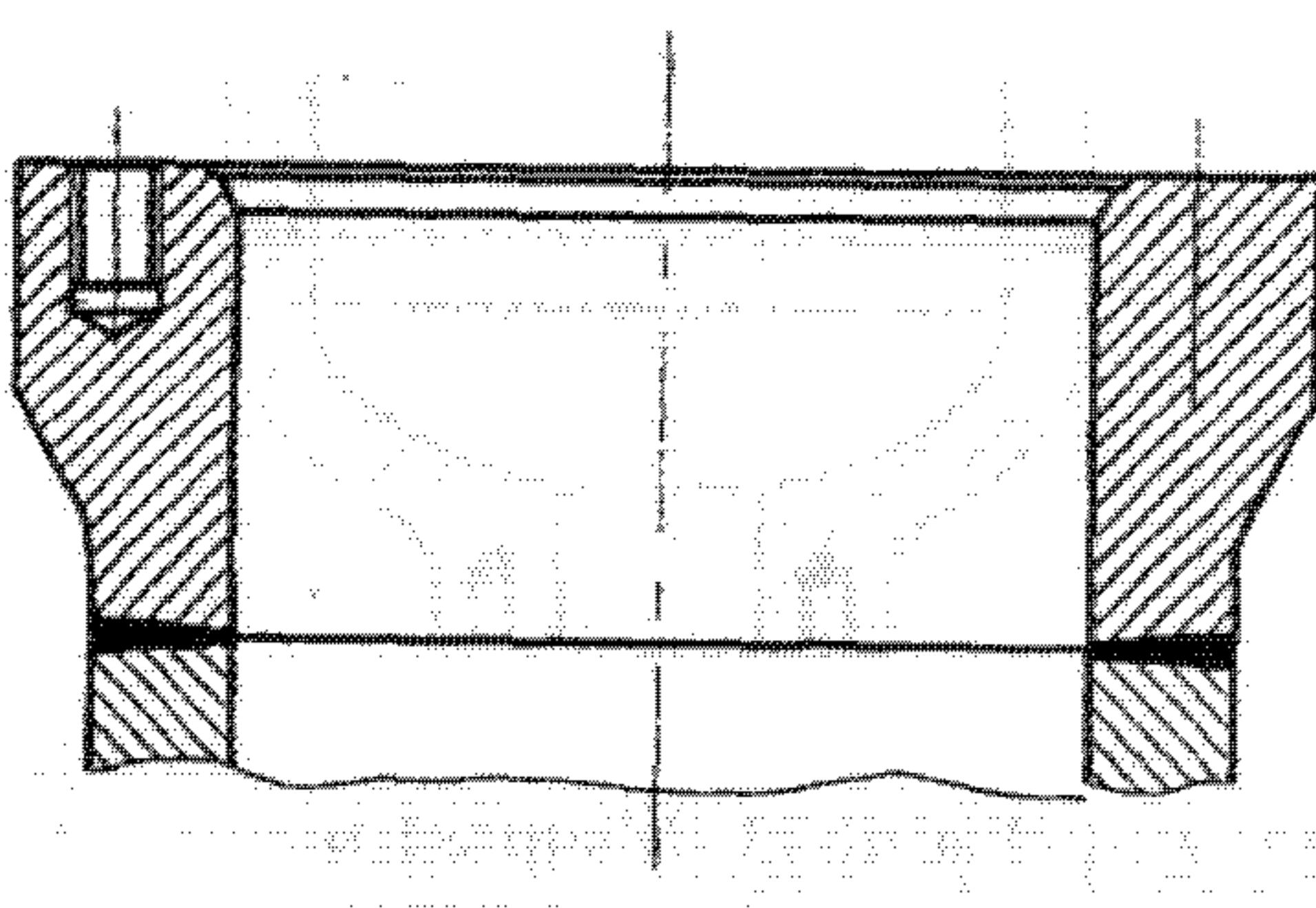


Рис. 26.17. Фланец АВД приварной к монолитной обечайке

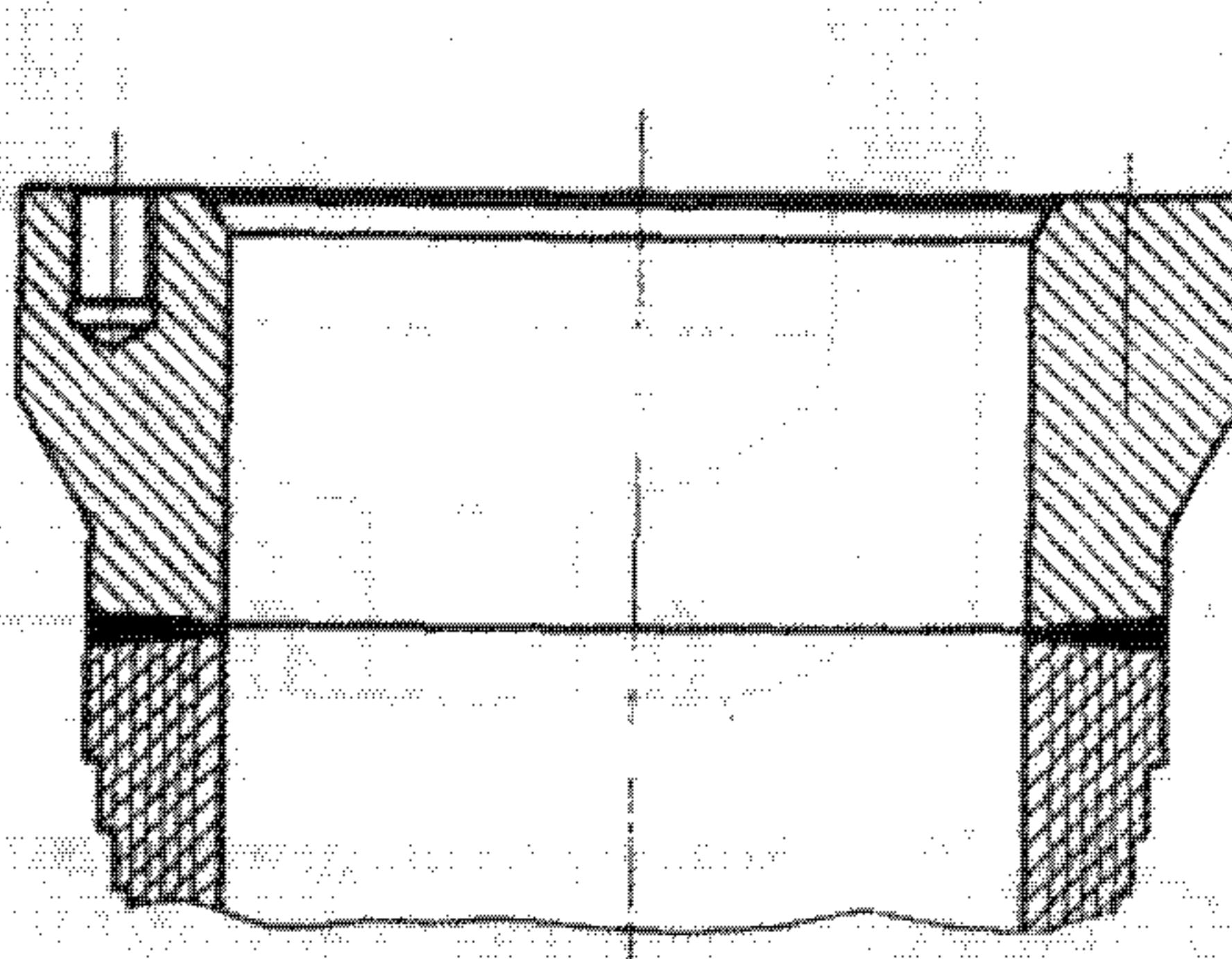


Рис. 26.18. Фланец АВД приварной к многослойной обечайке

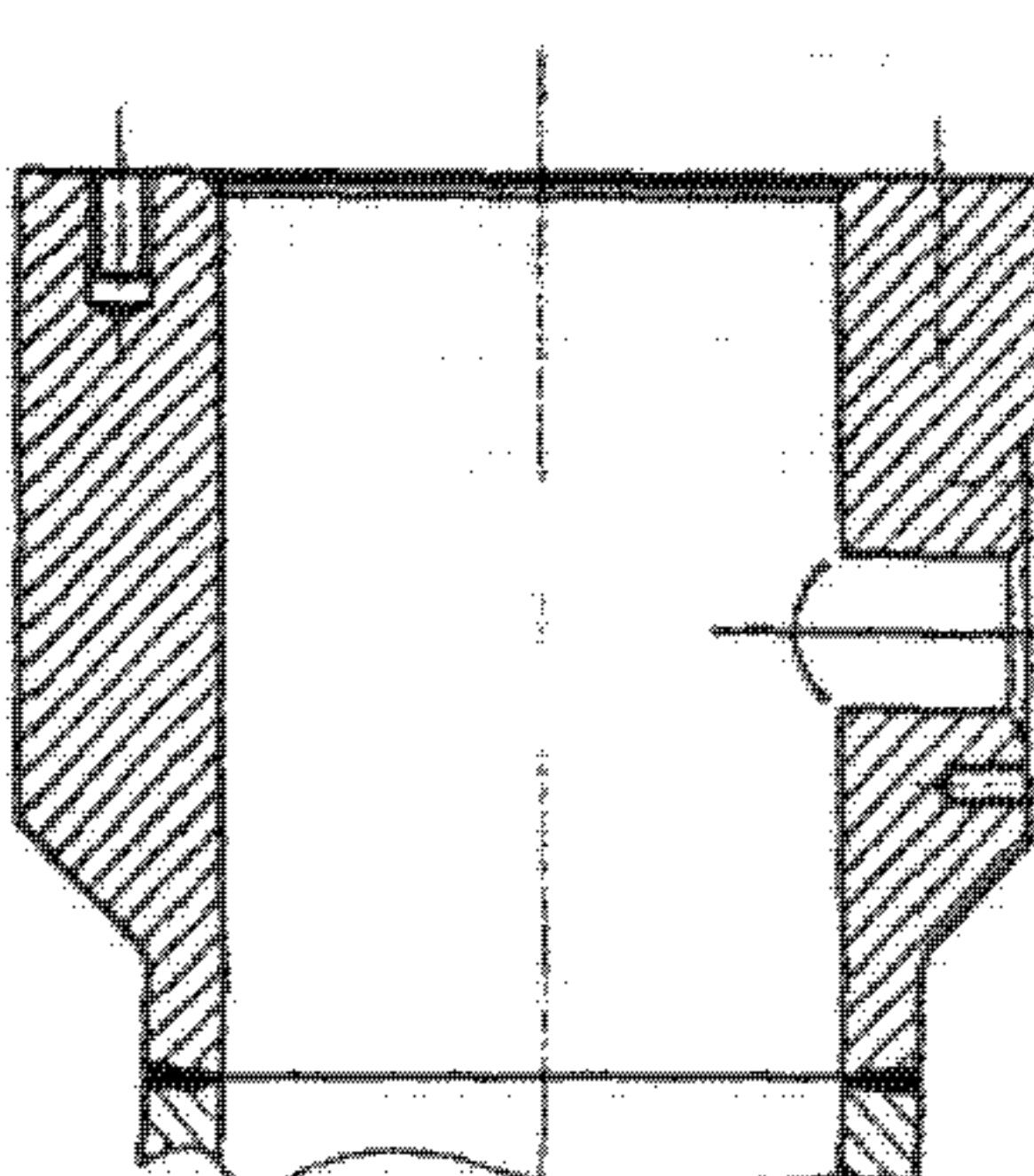


Рис. 26.19. Фланец АВД с боковым отверстием

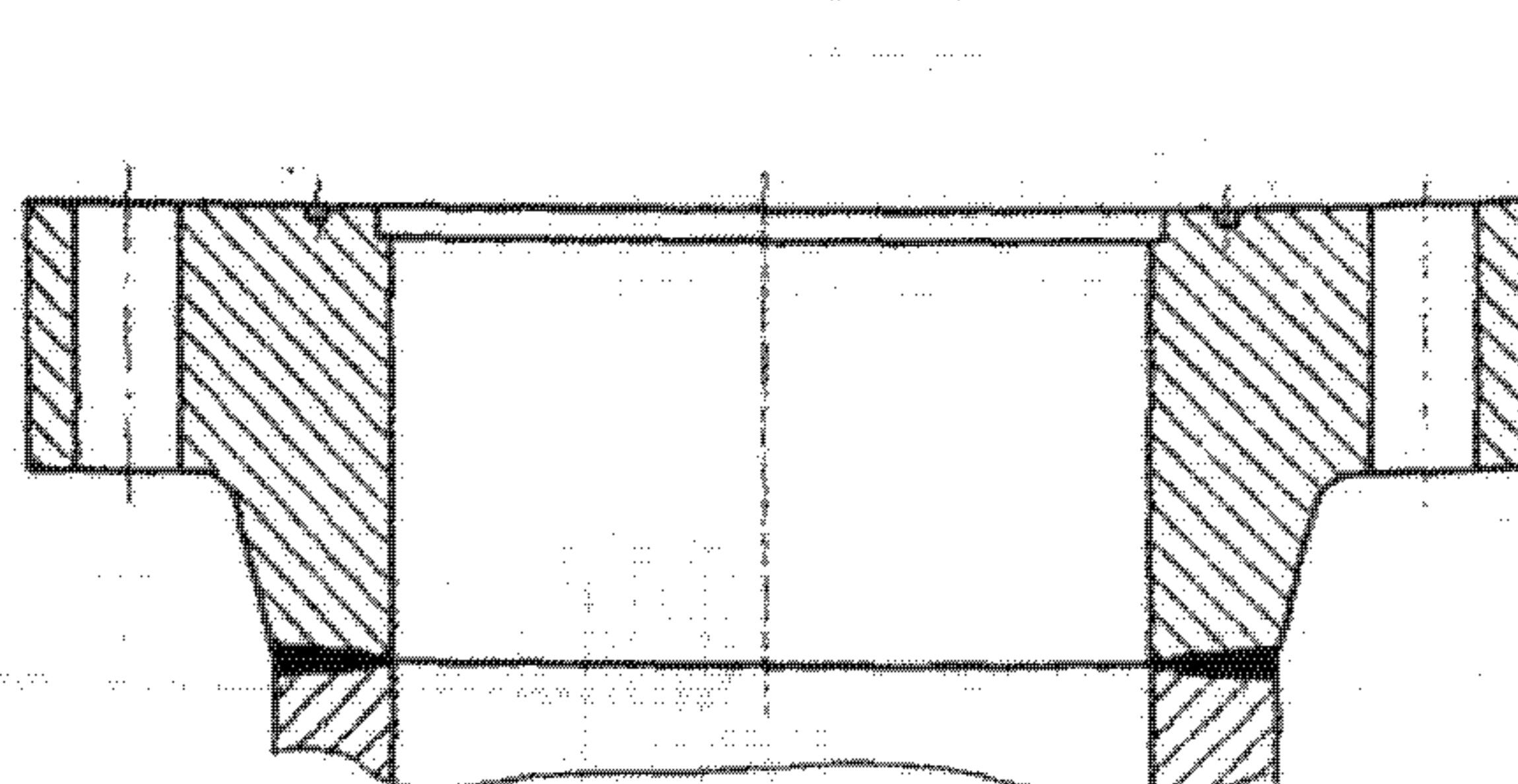


Рис. 26.20. Фланец АВД под проходные шпильки

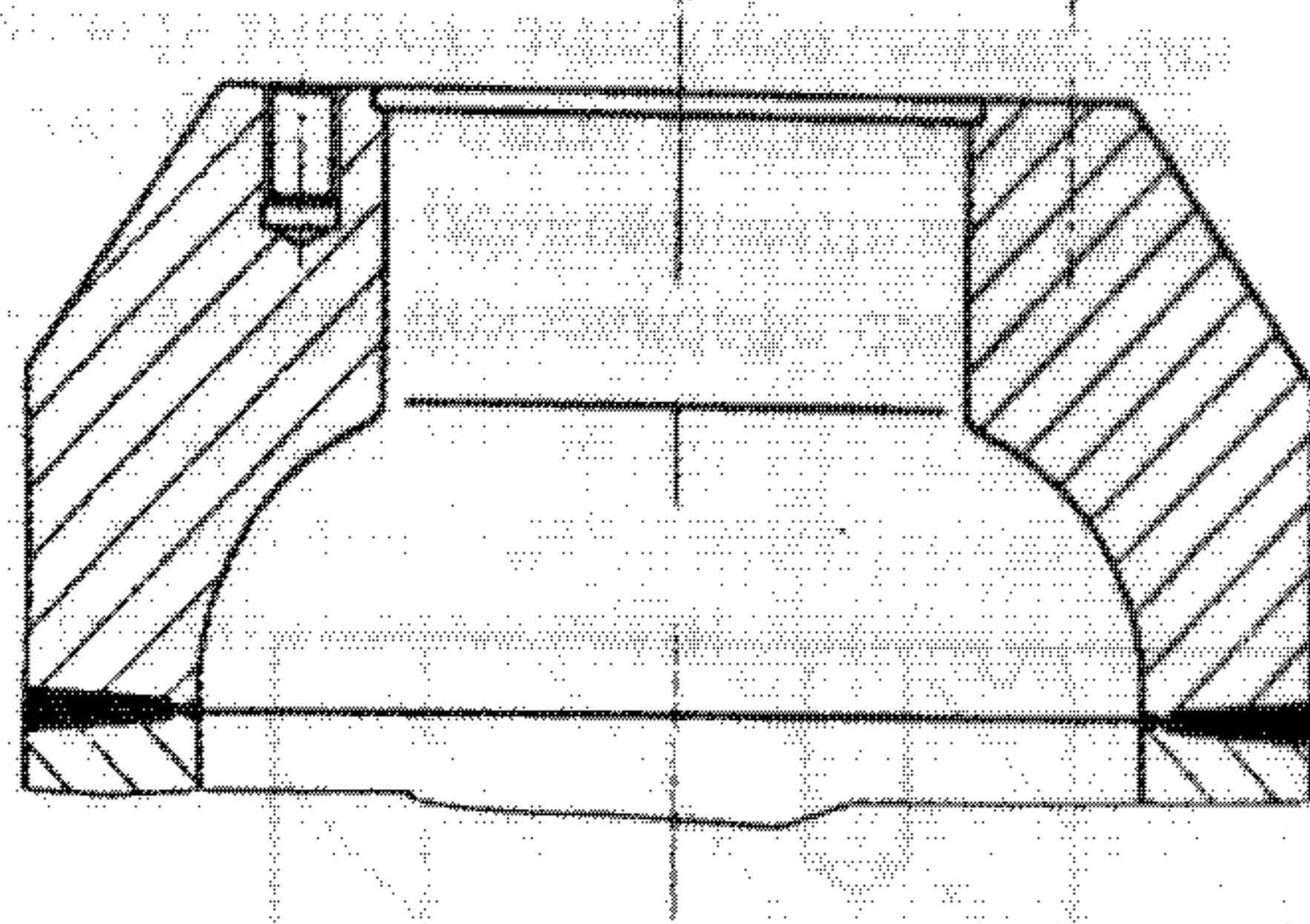


Рис. 26.21. Кованая горловина АВД

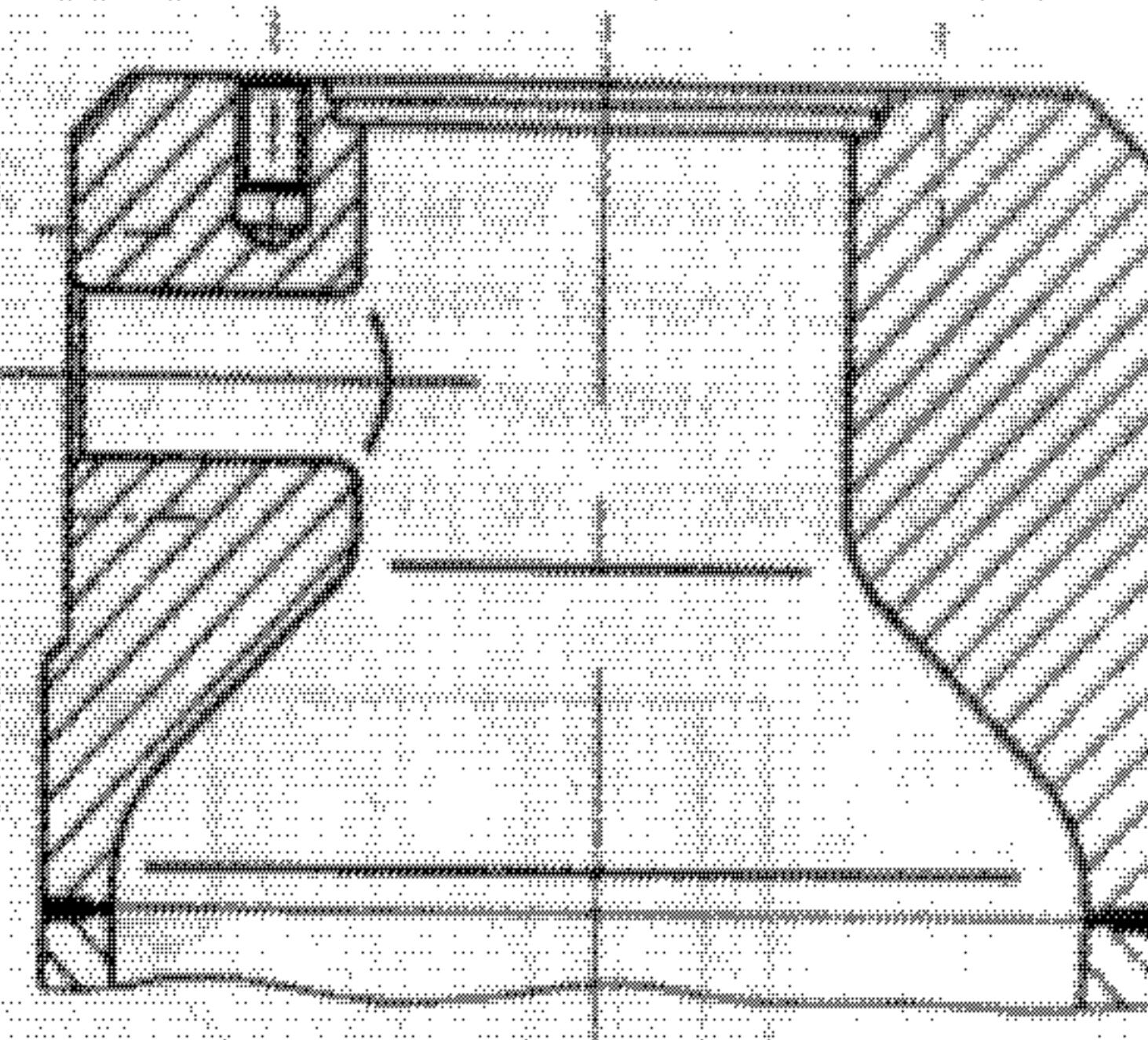


Рис. 26.22. Кованая горловина АВД с
боковым отверстием

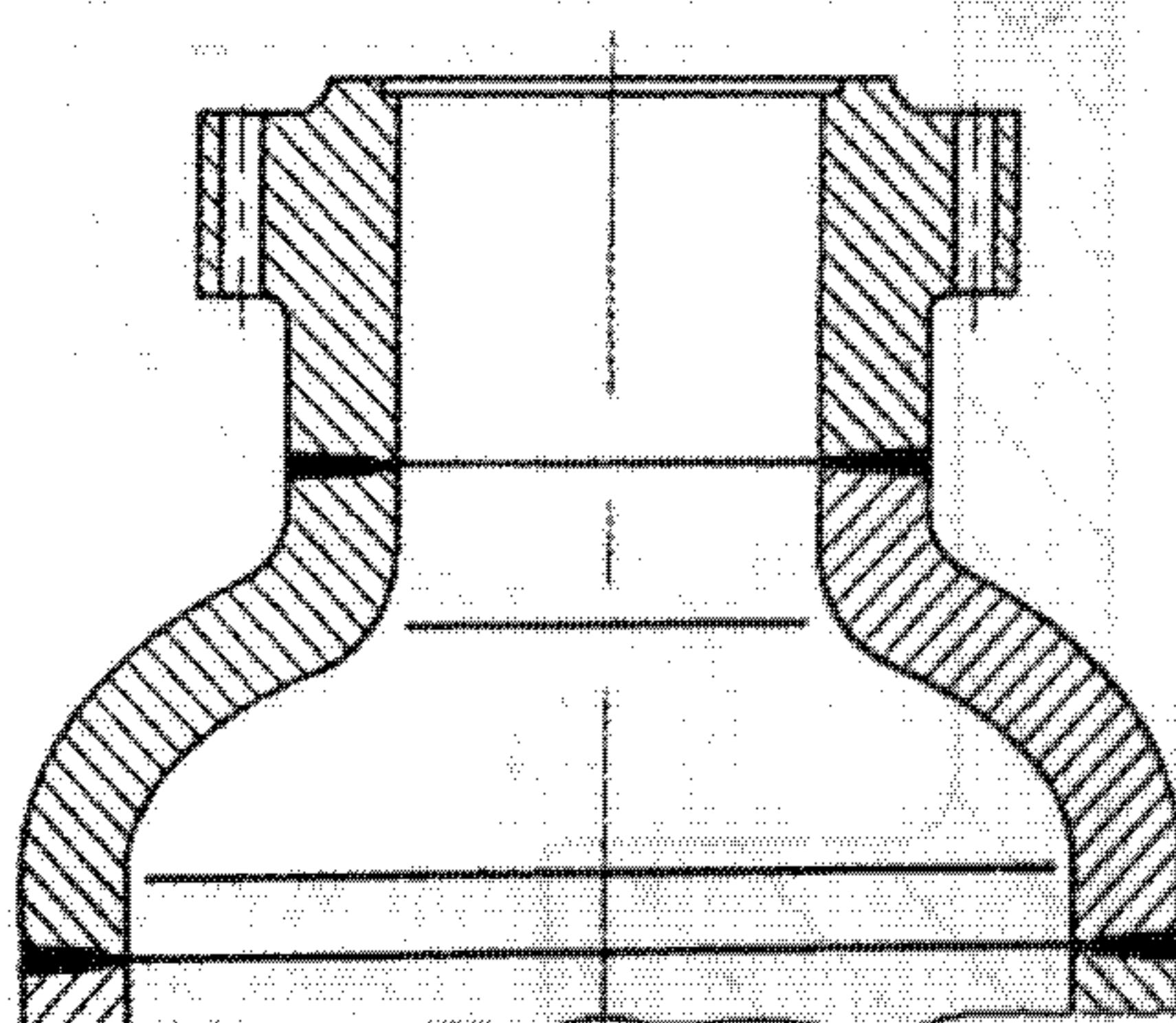


Рис. 26.23. Штампованный горловина АВД

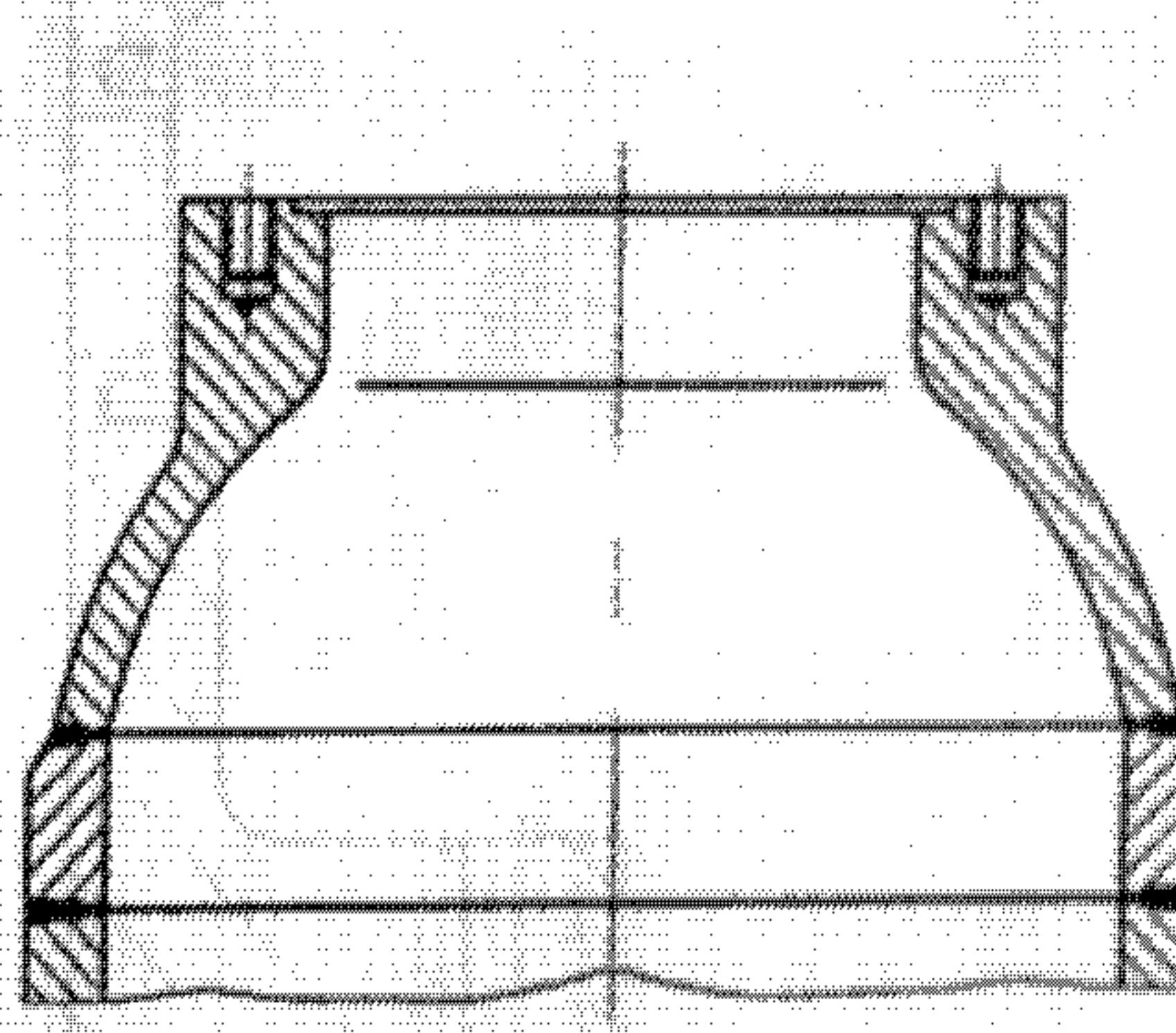


Рис. 26.24. Кованая горловина
крупногабаритного АВД

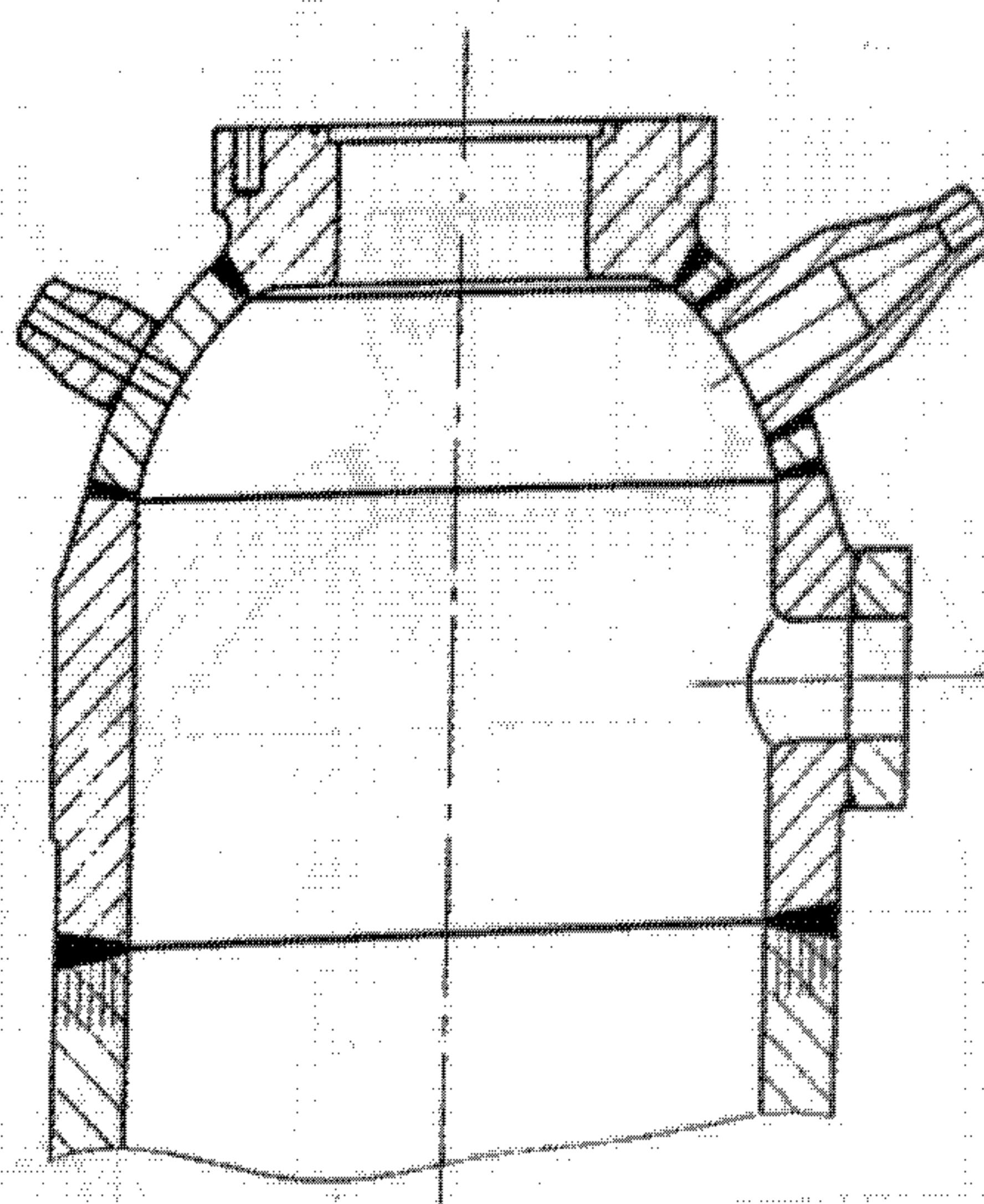


Рис. 26.25. Горловина АВД
с боковыми штуцерами

26.2.4. Крышки

Для АВД малых и средних диаметров широко применяются плоские кованые крышки (рис. 26.26).

Примером более сложной конструкции, со сферической внутренней поверхностью и с цельным штуцером, является крышка на рис. 26.27.

Для АВД больших диаметров применяются комбинированные выпуклые сварные крышки, состоящие из кованого фланца и эллиптической или сферической кованой или штампованной части.

Пример сферической крышки — рис. 26.28.

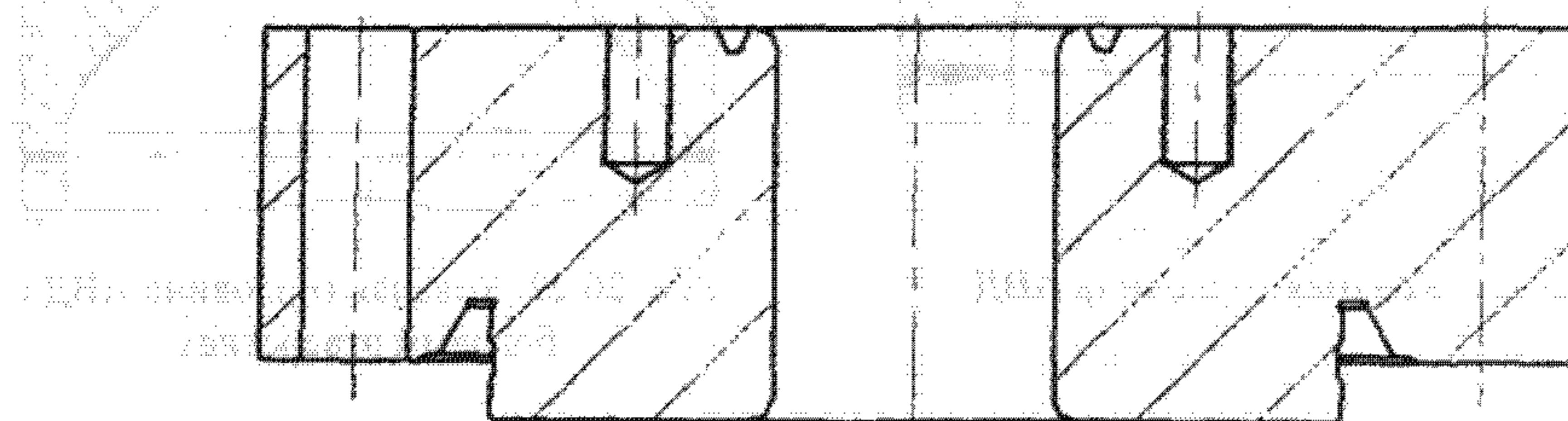


Рис. 26.26. Плоская кованая крышка

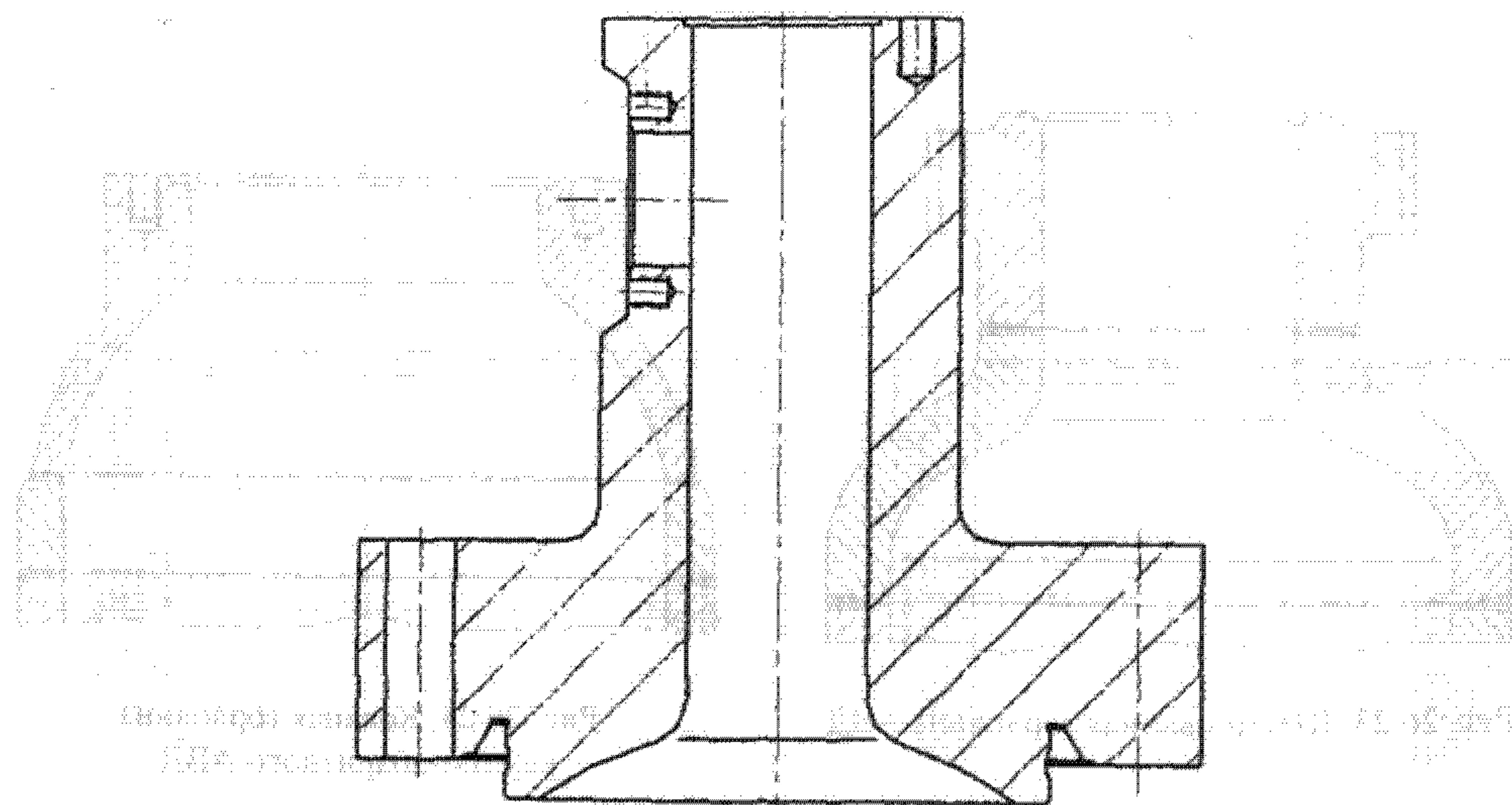


Рис. 26.27. Плоская кованая крышка
с цельным штуцером

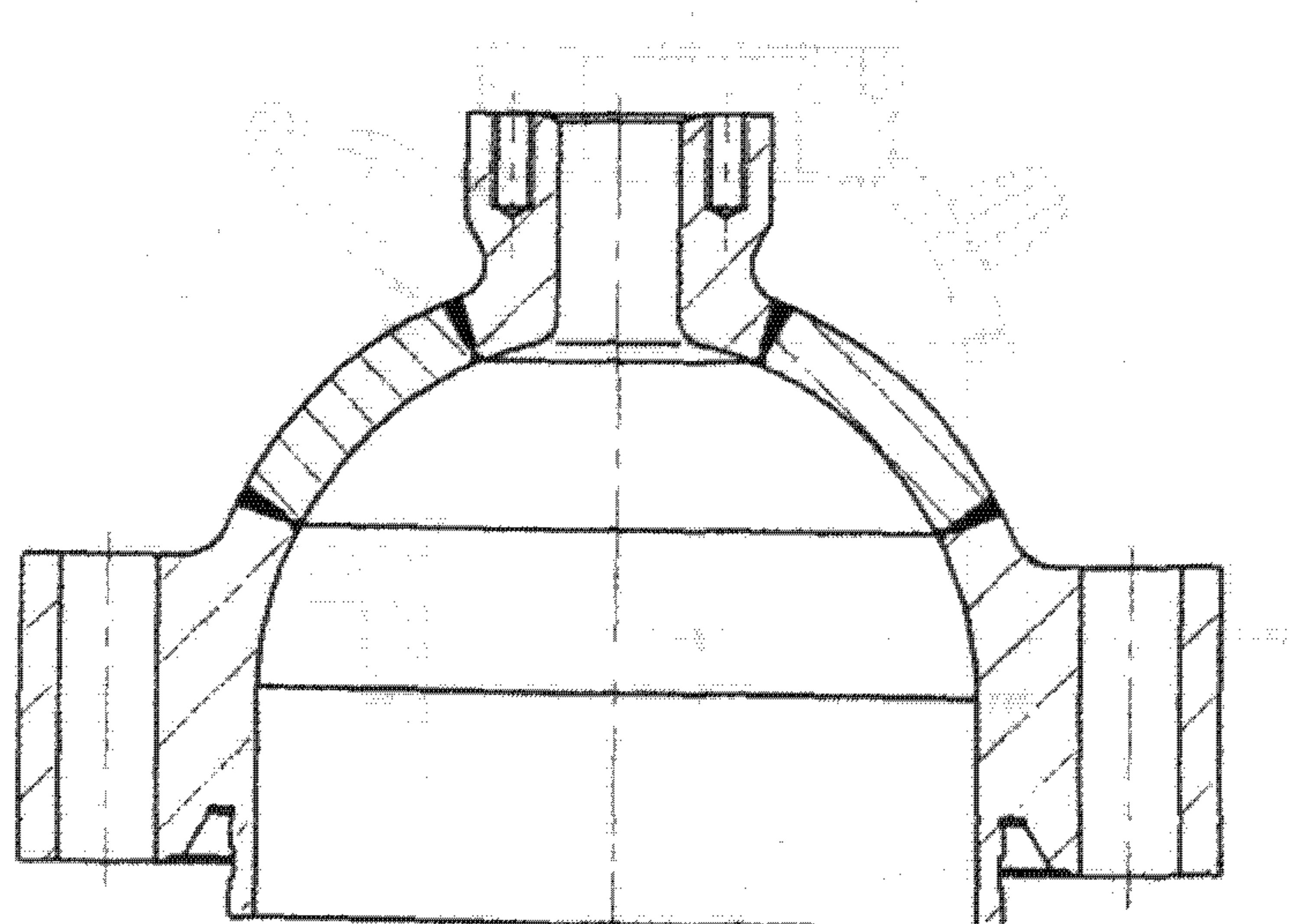


Рис. 26.28. Сферическая крышка ковано- или
штампованной конструкции

26.2.5. Трубные решетки

Конструкции трубных решеток для кожухотрубных теплообменников ВД зависят от типа теплообменника (прямоточный или с U-образными трубками), способа компенсации разницы линейных удлинений кожуха и трубчатки, способа закрепления самой трубной решетки в корпусе (на сварке или с разъемом), а также от величины перепада давления по трубному и межтрубному пространствам.

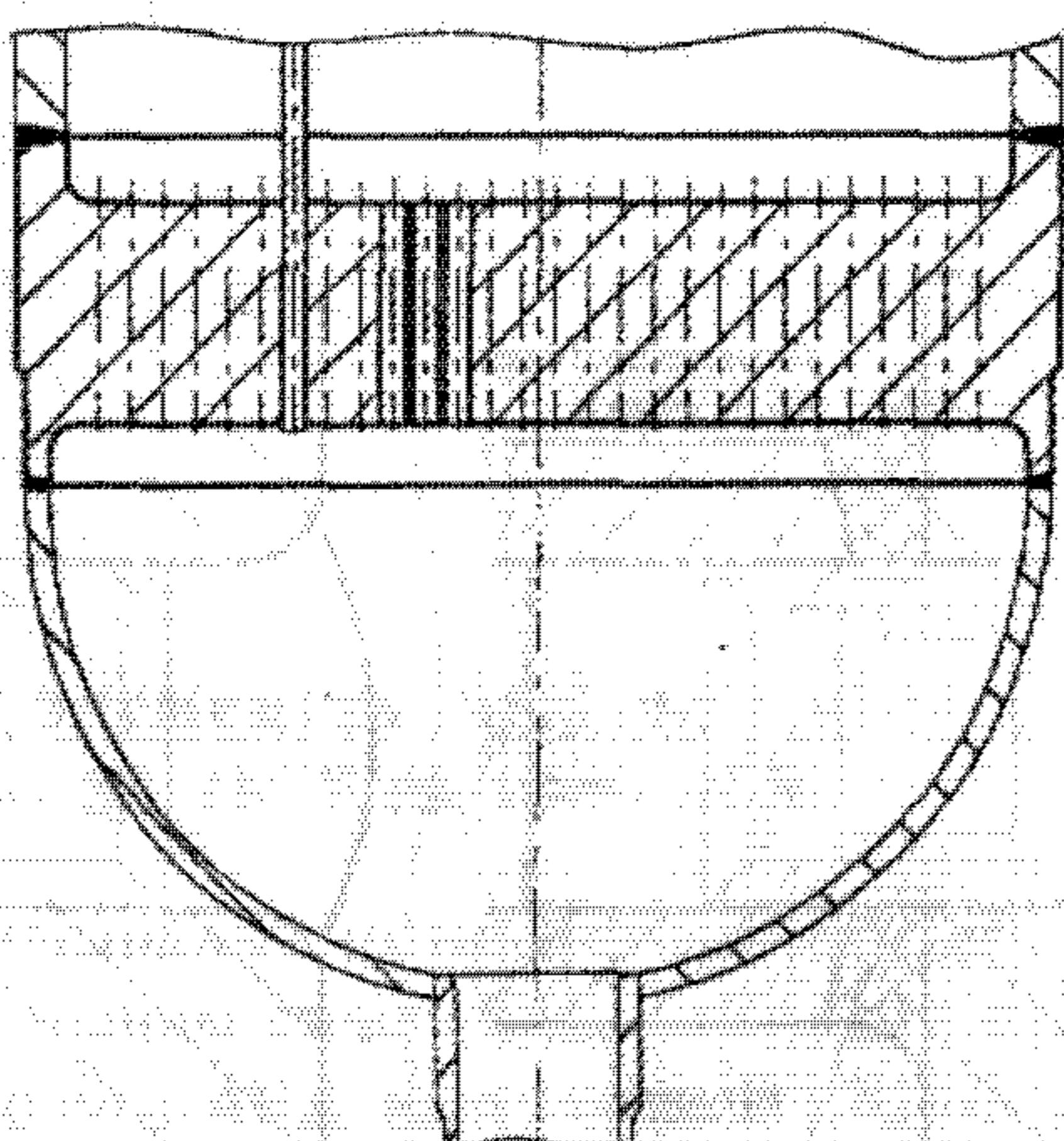


Рис. 26.29. Трубная решетка в жестком соединении с корпусом трубного и кожухом межтрубного пространства

Примером жесткого закрепления трубной решетки между корпусом трубного и кожухом межтрубного пространства, работающих под ВД, является конструкция, показанная на рис. 26.29.

Типовая конструкция трубной решетки, образующей одновременно разъемную камеру трубного пространства, показана на рис. 26.30.

Конструкция трубной решетки, зажатой в разъемном соединении между фланцами корпусов трубного и межтрубного пространств, изображена на рис. 26.31.

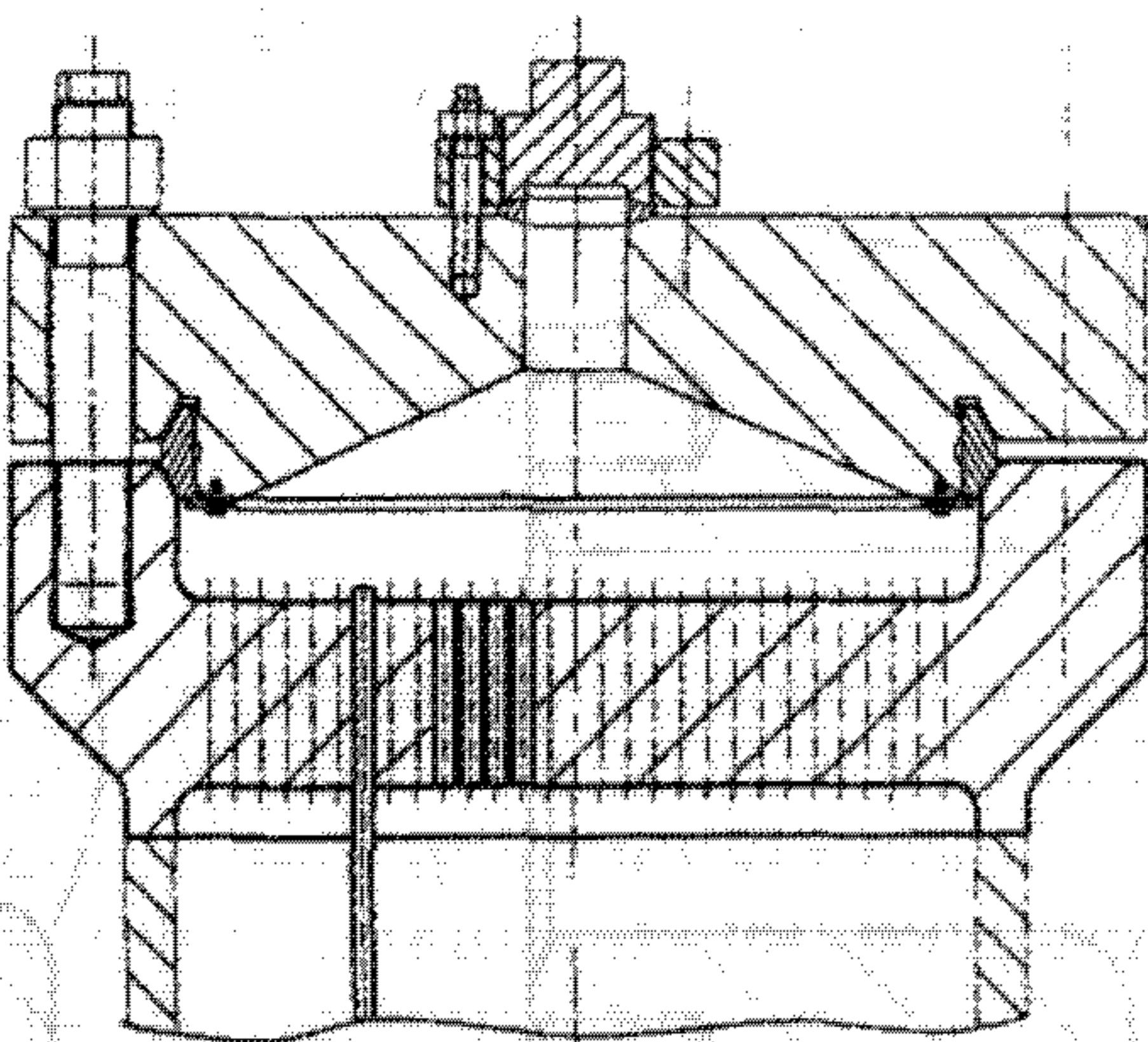


Рис. 26.30. Трубная решетка, образующая разъемную камеру трубного пространства

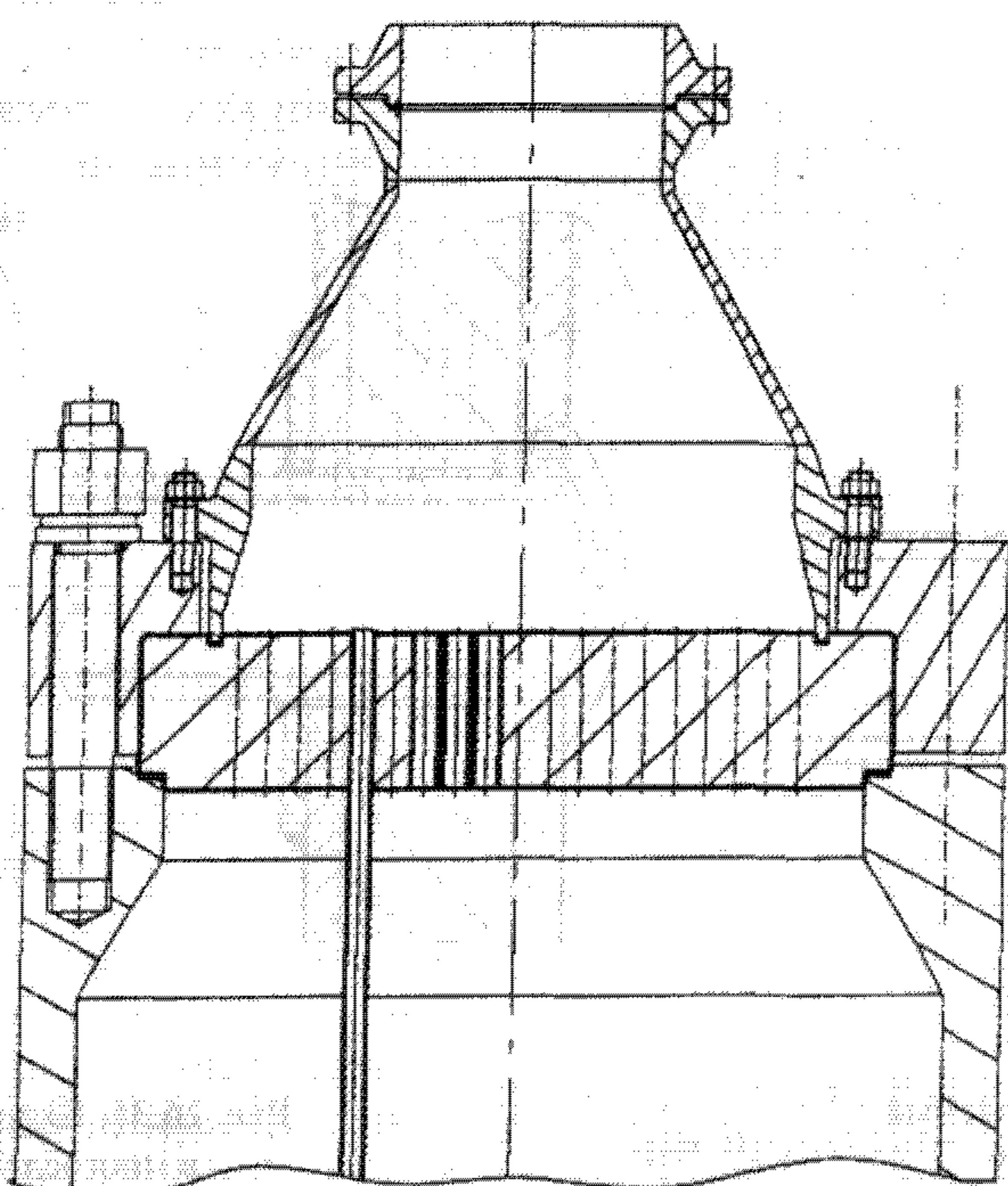


Рис. 26.31. Трубная решетка, зажимаемая между фланцами

26.2.6. Штуцера

Примеры конструкций штуцеров для монолитных АВД показаны на рис. 26.32, 26.33 и 26.34.

В случае, если отверстие в стенке АВД не требует укрепления или его можно укрепить за счет местного утолщения стенки в зоне отверстия, применяются конструкции типа показанной на рис. 26.35.

Наиболее оптимальная конструкция приварки штуцера изображена на рис. 26.33. При этом приварка производится на подкладном кольце или при соединении «в замок», которые удаляются после сварки механическим способом, т.е. рассверливанием или проточкой до необходимого рабочего диаметра для удаления корня сварного шва, где возможны сварочные дефекты.

Вварка штуцера на рис. 26.34 применяется в случае необходимости выполнения его из коррозионностойкого материала и футеровки внутренней поверхности АВД для защиты от коррозии соответствующей листовой сталью.

Примеры конструкций штуцеров, ввариваемых в многослойную стенку, приведены на рис. 26.35 и 26.36. Их особенностью является необходимость выполнения различных переходных наплавок как на штуцер, так и на разделку под сварку в многослойной стенке.

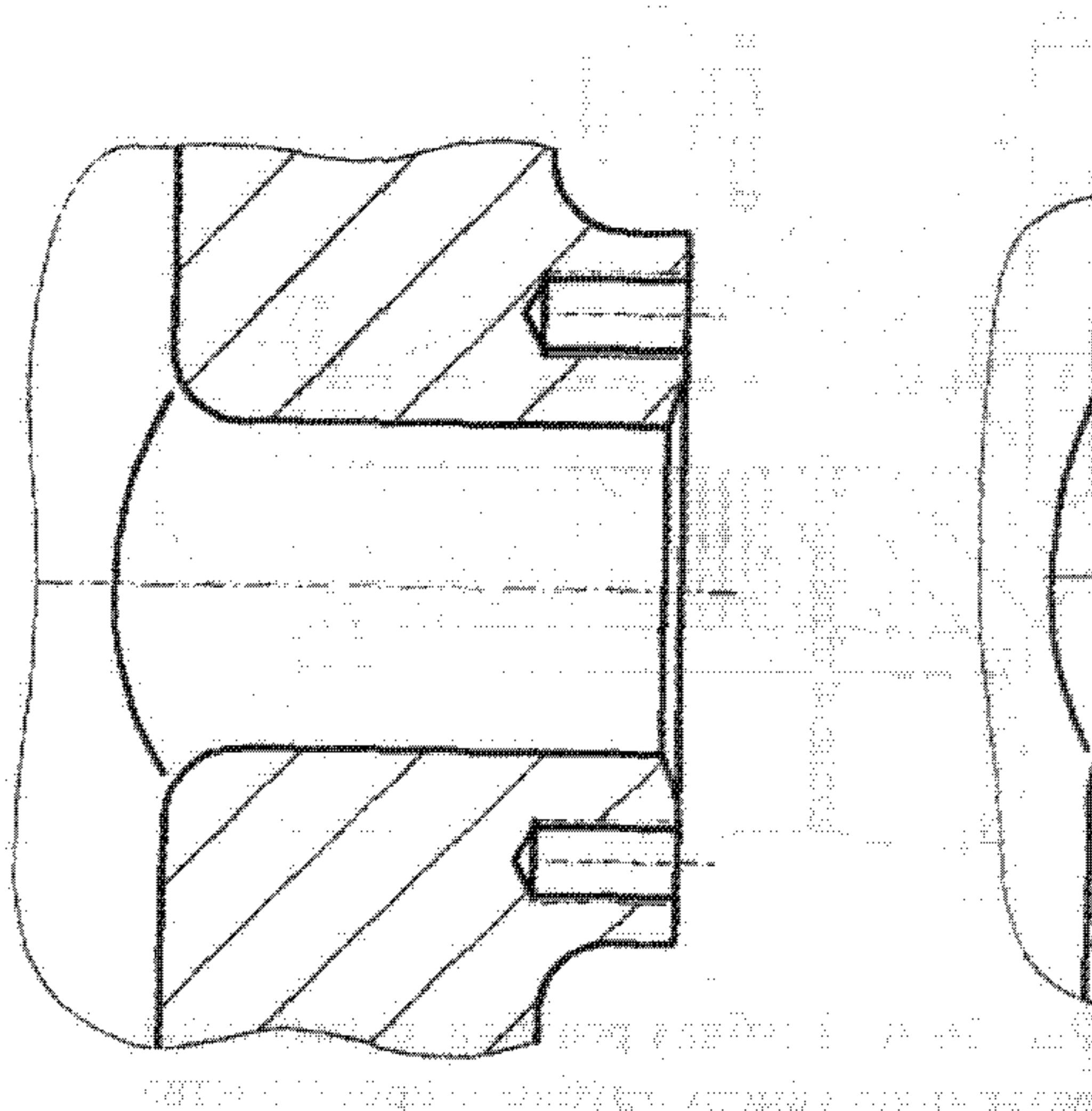


Рис. 26.32. Отверстие в монолитной стенке

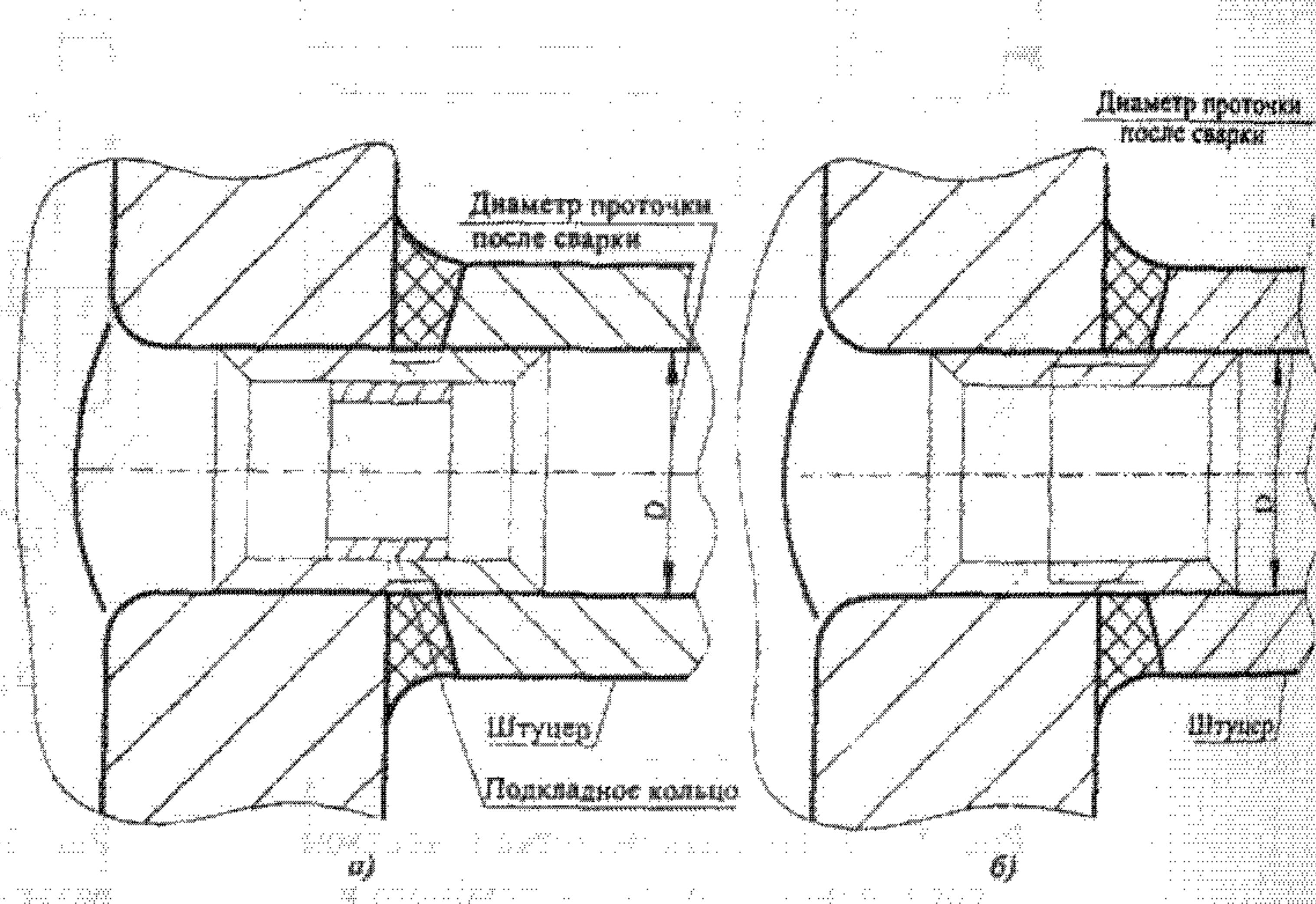


Рис. 26.33. Приварной штуцер к монолитной стенке

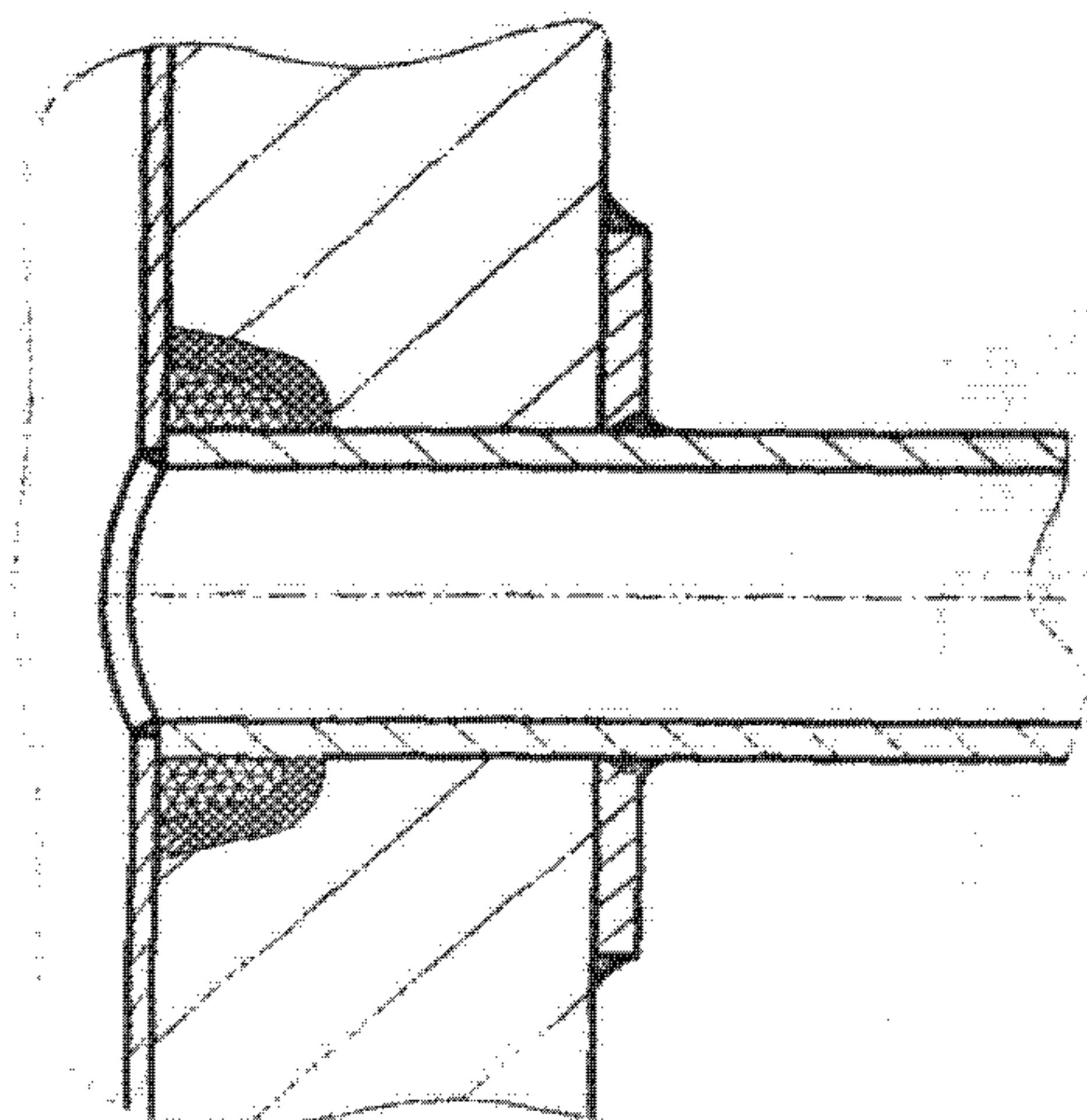


Рис. 26.34. Штуцер, ввариваемый в монолитную стенку

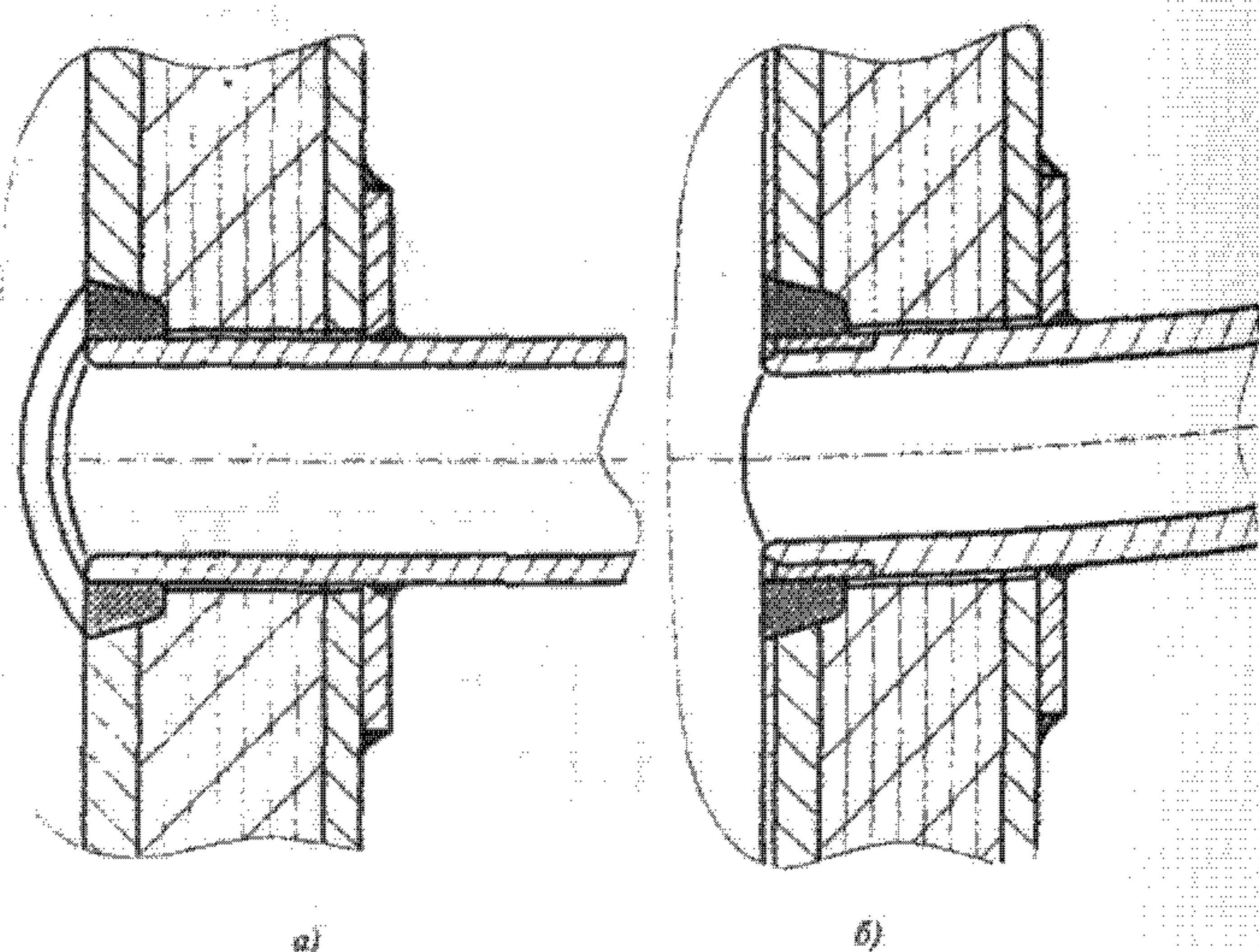


Рис. 26.35. Штуцер, ввариваемый в многослойную стенку

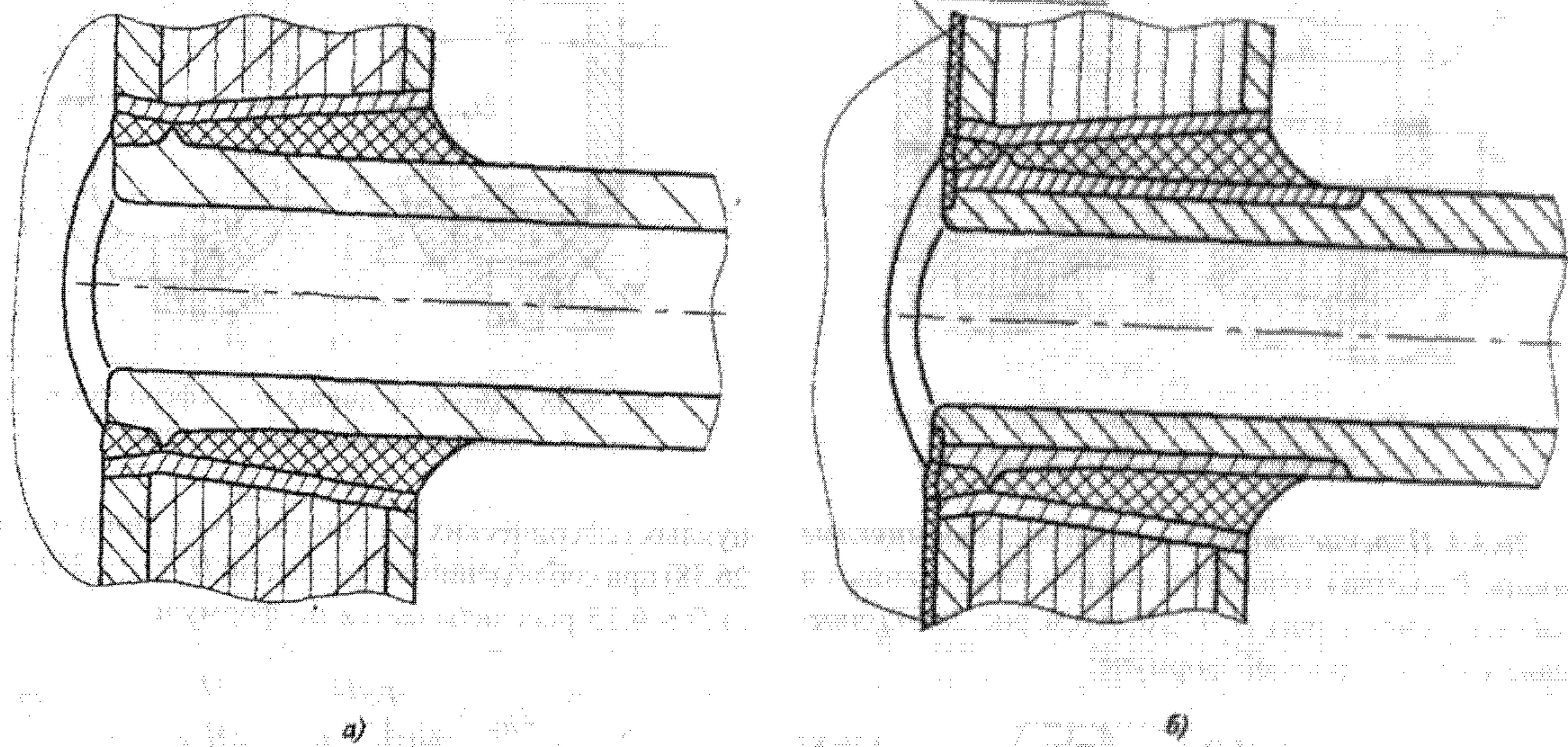


Рис. 26.36. Вариант сварки крупного штупера в многослойную стенку

26.3. Расчет элементов АВД на прочность (ГОСТ 25215—82, ОСТ 26-1046—87)

26.3.1. Однослойные цилиндрические корпуса.

Определение толщины стенки однослойного цилиндрического корпуса АВД проводится из формулы предельного расчетного внутреннего давления

$$p_k = [\sigma] \ln \beta, \quad (26.1)$$

где $\beta = (R + 2s)/(R + c)$ — коэффициент толстостенности; R — внутренний радиус аппарата.

При расчете элементов АВД по предельным нагрузкам величина допускаемого напряжения $[\sigma]$ для углеродистых, низко- и среднелегированных сталей находится из условия

$$[\sigma] = \min \left(\frac{\sigma_{\text{или } \sigma_{\text{ак}}}}{n_1}, \frac{\sigma_s}{n_2} \right), \quad (26.2)$$

где значения коэффициентов запаса прочности по пределу текучести и по пределу прочности соответственно равны $n_1 = 1,5$, $n_2 = 2,4$.

Тогда толщина стенки однослойного цилиндрического корпуса будет определяться по формуле:

$$s = R \left[\exp \left(\frac{p_k}{[\sigma] \cdot \phi} \right) - 1 \right] + c. \quad (26.3)$$

При использовании различных приближенных выражений для значения логарифма в зависимости (26.1), например, $\ln \beta \approx 2(\beta - 1)/(\beta + 1)$ выражение для расчета толщины стенки примет следующий вид:

$$s = \frac{p_k R}{[\sigma] \phi - 0,5 p_k} + c. \quad (26.4)$$

26.3.2. Многослойные цилиндрические корпуса.

Расчет толщины стенки многослойных цилиндрических корпусов проводят по зависимости (26.3). Величину допускаемого напряжения для таких корпусов определяют по зависимости:

$$[\sigma] = [\sigma]_{\text{ср}} = \frac{[\sigma_1] \cdot s_1 + [\sigma_2] \cdot s_2 + \dots + [\sigma_n] \cdot s_n}{s_1 + s_2 + \dots + s_n}, \quad (26.5)$$

где $[\sigma]_{\text{ср}}$ — среднее допускаемое напряжение для многослойной обечайки при расчетной температуре; $[\sigma_1], [\sigma_2], \dots, [\sigma_n]$ — допускаемые напряжения материала 1-го, 2-го ... n -го слоев.

При проектировании многослойных АВД толщины центральной обечайки s_1 и наружного слоя s_n , как правило, принимаются конструктивно, а все остальные слои изготавливают из одного материала, принимая при этом $[\sigma_2] = [\sigma_3] = \dots = [\sigma_{n-1}] = [\sigma]_{\text{ср}}$. В этом случае искомая толщина стенки будет находиться по формуле:

$$s = R \left[\exp \left(\frac{p_{\text{р1}}}{[\sigma]_{\text{ср}}} \right) - 1 \right] + s_1 + s_n, \quad (26.6)$$

где R_1 — внешний радиус центральной обечайки; $p_{\text{р1}}$ — расчетное внутреннее давление в центральной обечайке.

Величина давления $p_{\text{р1}}$ рассчитывается по зависимости:

$$p_{\text{р1}} = p_k - [\sigma] \ln \frac{R_1}{R} - [\sigma] \ln \frac{R_1}{R_n - s_n}, \quad (26.7)$$

где R_n — наружный радиус аппарата.

При проектировании рулонированных аппаратов к полученной по зависимости (26.5) толщине стенки прибавляют еще толщину одного слоя на виваемой полосы.

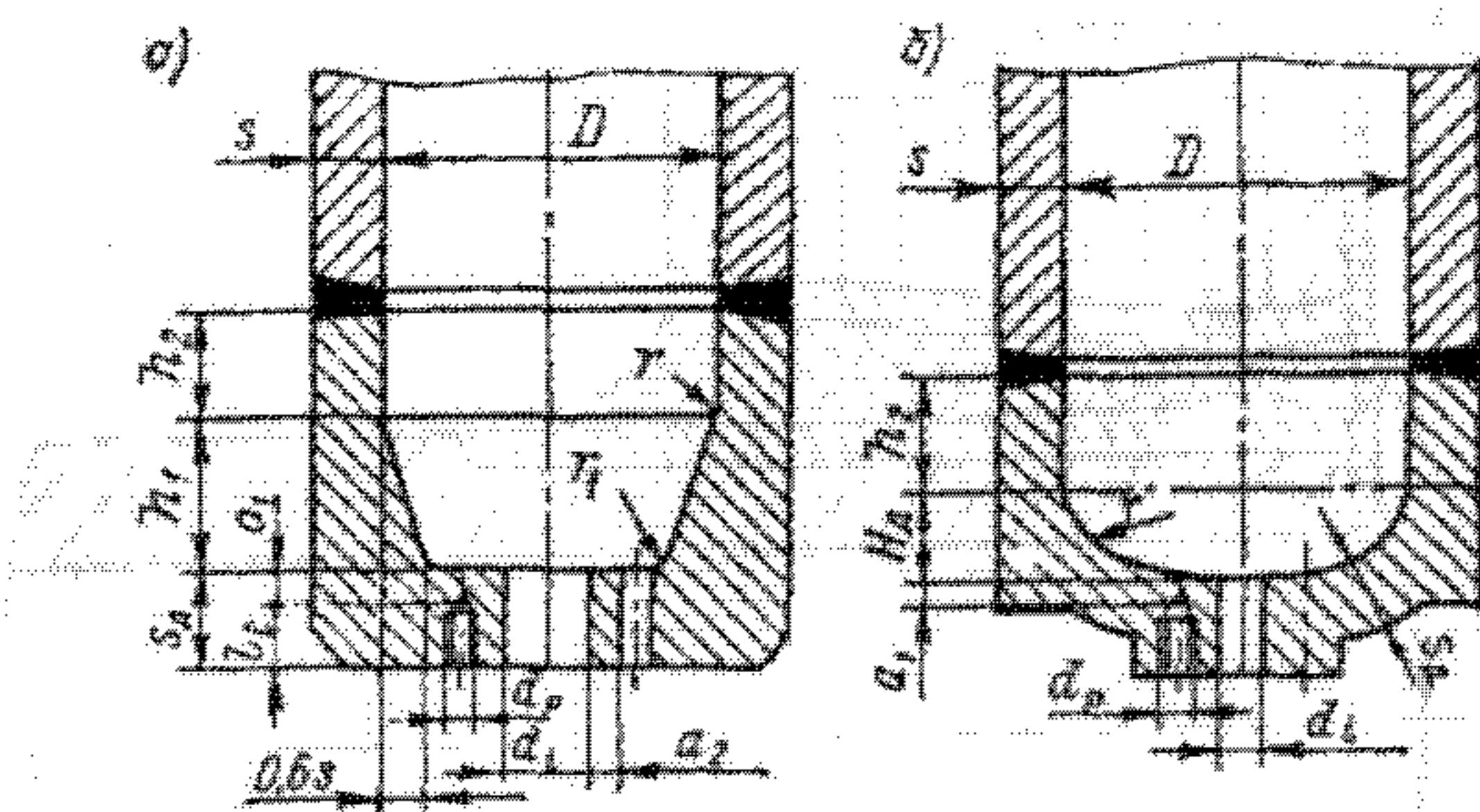


Рис. 26.37. Днища: а — плоское отбортованное; б — слабовыпуклое ($H/D \leq 0,25$)

26.3.3. Плоские отбортованные и слабовыпуклые днища. Расчетная толщина плоских отбортованных и слабовыпуклых днищ с $H_s/D \leq 0,25$ (см. рис. 26.37) определяется по следующей формуле:

$$s_{\text{дк}} = 0,45D \sqrt{p_R / (\sigma \psi_0)}, \quad (26.8)$$

где ψ_0 — коэффициент ослабления днища отверстиями,

$$\psi_0 = \frac{1 - \sum d_i/D}{1 - \sum (d_i/D)^3}. \quad (26.9)$$

Здесь $\sum d_i$ — сумма диаметров отверстий для наиболее ослабленного диаметрального сечения.

При $\sum d_i/D > 0,6$ следует принимать $\psi_0 = 0,4$.

В случае одиночного центрального отверстия диаметром d_o ,

$$\psi_0 = \frac{1}{1 + d_o/D + (d_o/D)^2}. \quad (26.10)$$

Диаметры несквозных отверстий под шпильки для присоединяемых к днищу различных элементов входят в величину $\sum d_i$, умноженные на коэффициент $2l_i/s_i$, где l_i — глубина i -го отверстия; s_i — исполнительная толщина днища (см. рис. 26.8). При $l_i > s_i/2$ коэффициент $2l_i/s_i$ принимается равным 1,0. Расстояние a_i между кромками двух соседних отверстий, измеряемое по проекции чертежа, должно быть не менее диаметра меньшего отверстия. Значение a_i должно быть не менее $d_i + c$, где d_i — наружный диаметр резьбы гнезда под крепежную шпильку.

Исполнительная толщина днища s_i должна удовлетворять условию

$$s_i \geq s_{\text{дк}} + c. \quad (26.11)$$

Допускаемое рабочее давление

$$[p]_x = 5(s_i - c)^2 [\sigma] \psi_0 / D^2. \quad (26.12)$$

Радиусы сопряжения и высоты отдельных конструктивных частей днища (см. рис. 26.37) $r \geq s_p$; $r_i \geq 1,8s_p$; $h_1 \geq 1,8s_p$; $h_2 \geq s_p$, где $s_p = 0,5D (\beta_p - 1)$ — расчетная толщина обечайки корпуса в рабочих условиях.

26.3.4. Выпуклые днища. Расчетная толщина вы-

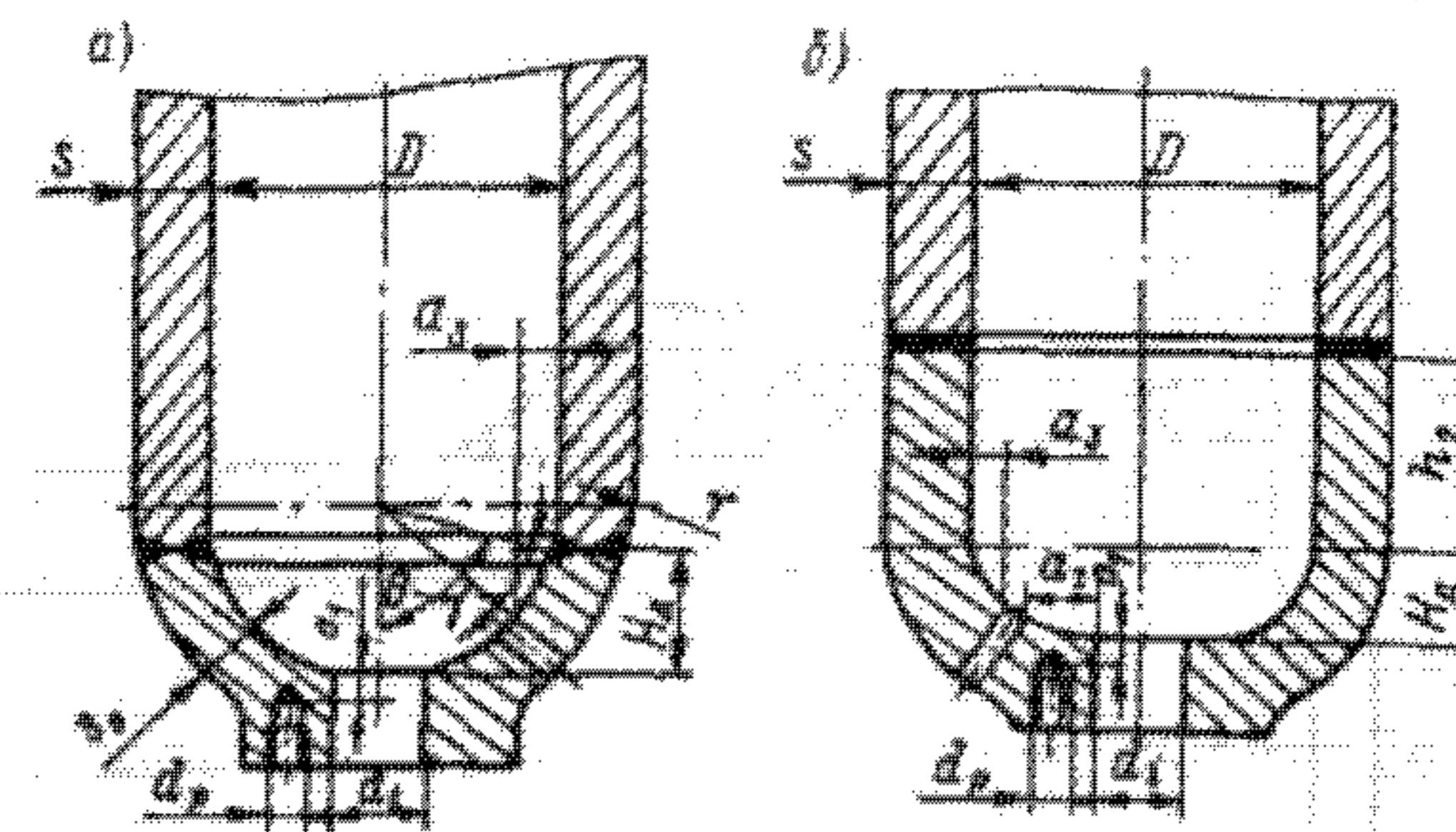


Рис. 26.38. Выпуклые днища: а — сферическое; б — отбортованное эллиптическое

пуклых (сферических и эллиптических днищ (см. рис. 26.38) при соблюдении соотношений $H_1/D \geq 0,25$ и $(s_i - c)/D \leq 0,15$ рассчитывается по формуле

$$s_{\text{вр}} = \frac{p_R D}{4[\sigma]_p - p_R} \frac{D}{2H_1}, \quad (26.13)$$

где H_1 — внутренняя высота выпуклой части днища, м; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение при расчетной температуре, определяемое по формуле (26.2).

Выпуклые эллиптические днища выполняют с отбортовкой (см. рис. 26.38, б). Толщина эллиптической части днища должна быть не менее расчетной толщины цилиндрической отбортованной части, определяемой по формуле (26.4) для материала днища. Кроме того, рекомендуется соблюдать следующие условия (см. рис. 26.38): расстояние от края отверстия до внутренней цилиндрической поверхности, измеряемое по проекции чертежа, $a_i \geq 0,1D$; значение величины отбортовки эллиптического днища $h_2 \geq 0,5D (\beta_p - 1)$; угол сферического сегмента $90^\circ \geq \theta \geq 75^\circ$; расстояние $a_i \geq d_p + c$; угол γ (см. рис. 26.38, а) от кромки днища до кромки отверстия должен быть не менее 35° .

Исполнительная толщина s_i должна удовлетворять условию

$$s_i \geq s_{\text{вр}} + c. \quad (26.14)$$

Выпуклые днища, предназначенные для многослойных обечайек, а следовательно, с ними сопрягаемые, рассчитываются также по формуле (26.13). Однако допускаемые напряжения для сферических днищ с углом сегмента $90^\circ \geq \theta \geq 87^\circ$ уменьшаются на 10 %, а при расчете эллиптических днищ и сферических с углом сегмента $87^\circ > \theta \geq 75^\circ$ уменьшения допускаемых напряжений не производят. Во всех случаях принятая толщина днища должна быть не менее $0,8s$ (исполнительной толщины многослойной обечайки).

Рабочее допускаемое давление определяется по формуле:

$$[p] = 4[\sigma] \Phi \left(\frac{D}{s_i - c} \frac{D}{2H_1} + 1 \right). \quad (26.15)$$

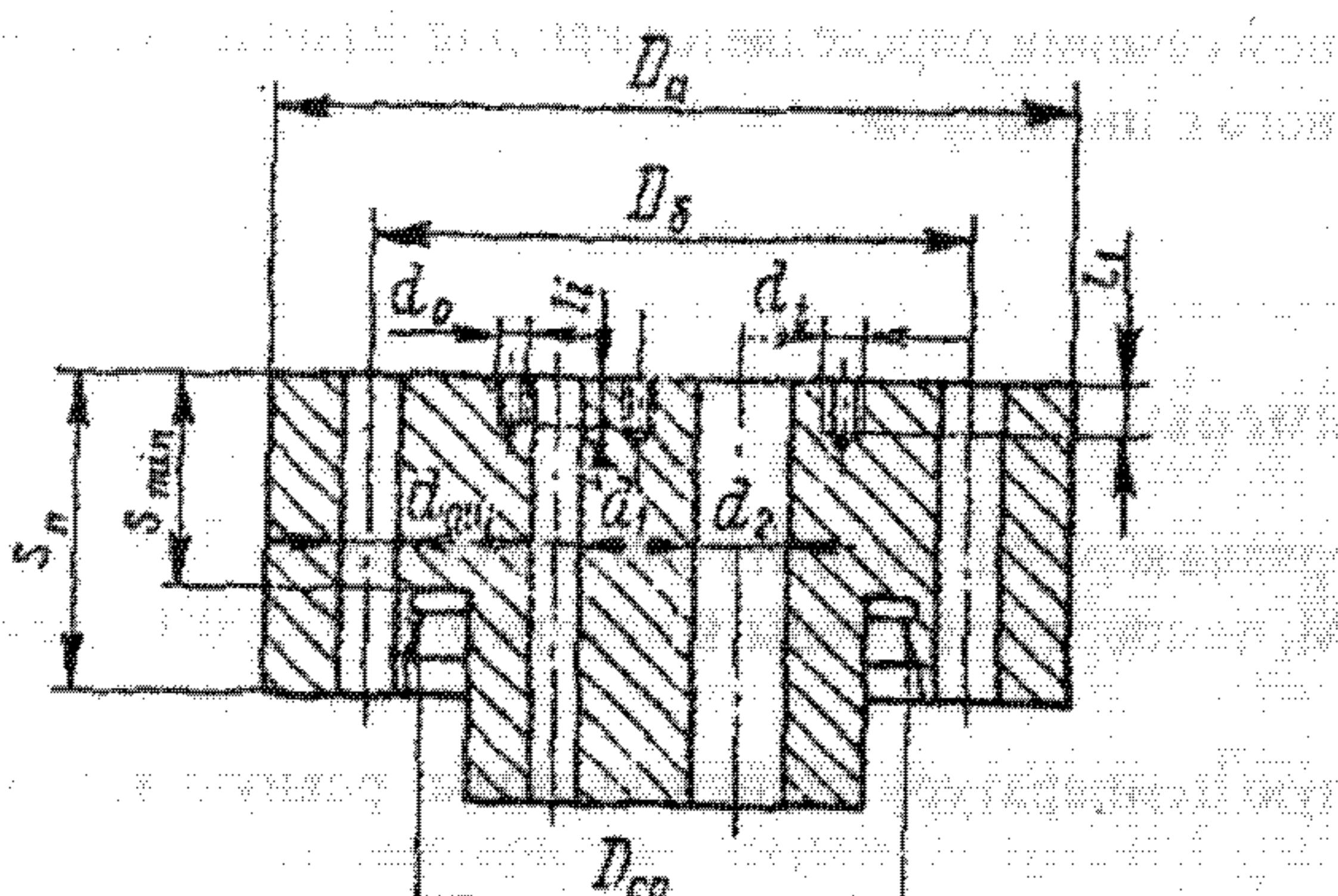


Рис. 26.39. Плоская крышка

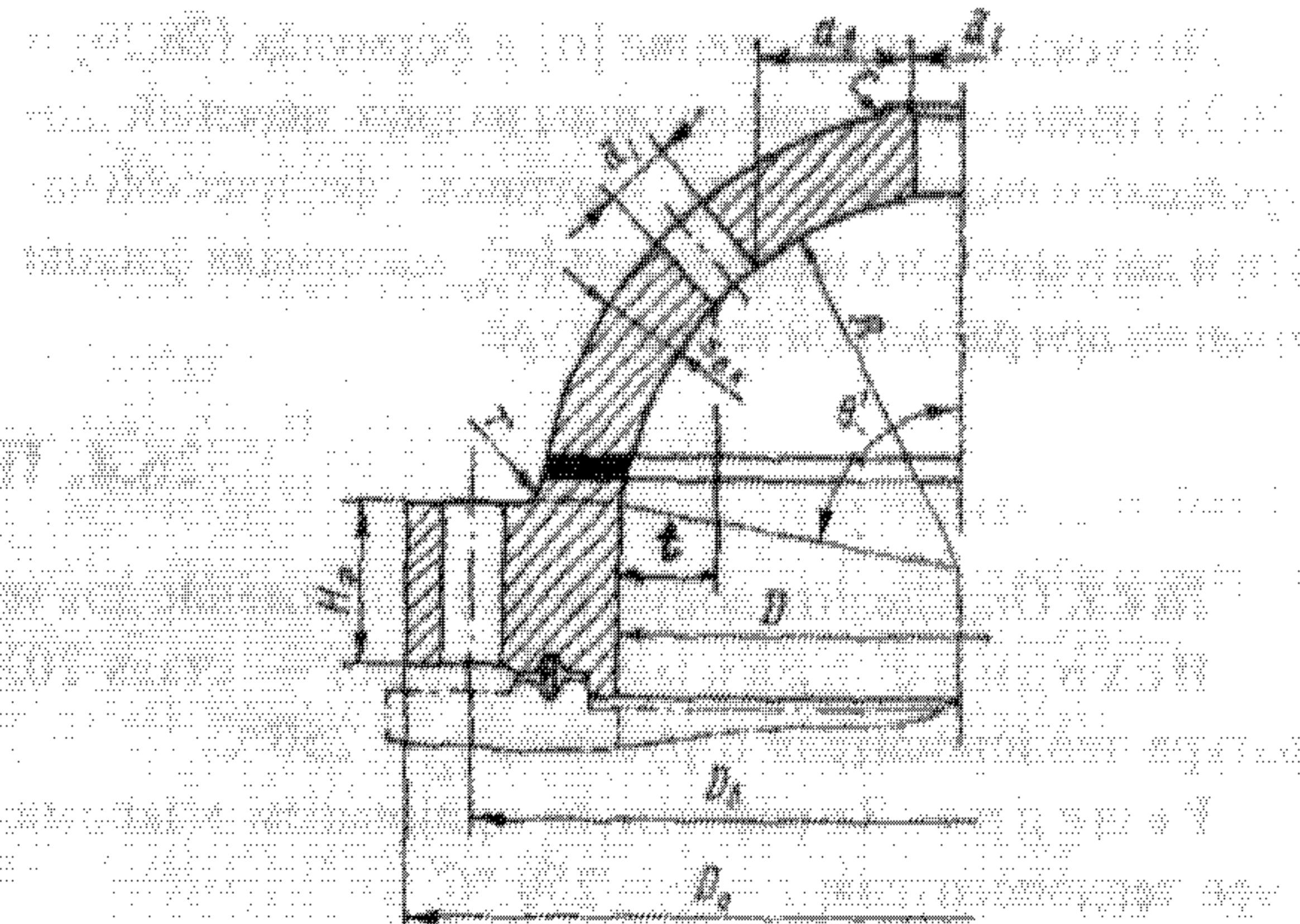


Рис. 26.40. Сферическая крышка

26.3.5. Плоские крышки. Отъемная плоская крышка аппарата высокого давления представляет собой сложнонапряженный элемент с наличием нескольких несимметрично расположенных отверстий (рис. 26.39). Из-за этих отверстий расчетные зависимости, основанные на теории круглых пластин или плит, для данного случая не представляются достоверными. Широко практикуется расчет из условия прочности на изгиб диаметрального сечения крышки, наиболее ослабленного отверстиями.

Исполнительная толщина плоских крышек (см. рис. 26.39), кроме крышек с приварными патрубками, рассчитывается по формуле:

$$s_{\text{ex}} \geq 0,41 \cdot D_{\text{ex}} \cdot \frac{p_{\text{ex}} \cdot \frac{D_{\text{ex}} + 3(D_s - D_{\text{cp}}) \cdot \frac{F_{\text{ex}}}{F_0}}{D_{\text{ex}} - 2d_{\text{ex}} - \sum_{i=1}^n d_i} + c}{[\sigma]} \quad (26.16)$$

где F_{ex} — расчетная сила, действующая на шпильки; F_0 — осевая сила от действия среды на крышку; D_s — диаметр окружности центров шпилек; D_{cp} — средний диаметр уплотнительной поверхности; D_{ex} — наружный диаметр крышки; d_{ex} — диаметр отверстия под крепежную шпильку, принимаемый в расчете равным диаметру резьбы шпильки d_p , т.е. $d_{\text{ex}} = d_p$; $\sum d_i$ — максимальная сумма длин хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметральном сечении крышки.

Наружный диаметр крышки назначается конструктивно из условия

$$D_{\text{ex}} \geq D_s + 2d_p. \quad (26.17)$$

Минимальная толщина крышки в месте расположения паза под уплотнение в случае применения затвора с двухконусным обтюратором

$$s_{\text{ex}} \geq 0,41 \cdot D_{\text{ex}} \times \dots \quad (26.18)$$

$$\times \frac{p_{\text{ex}} \cdot \frac{3(D_s - D_{\text{cp}}) \cdot \frac{F_{\text{ex}}}{F_0}}{D_{\text{ex}}} + 1,5 \left(\frac{p_{\text{ex}}}{[\sigma]} \right)^2 - 6 \cdot s_{\text{ex}}^2 \cdot \frac{D_s - D_{\text{cp}} - 2d_{\text{ex}}}{D_{\text{ex}}^3} + c}{[\sigma]} \quad (26.18)$$

26.3.6. Выпуклые сферические крышки. Выпуклую крышку рекомендуется выполнять в соответствии с рис. 26.40.

Выпуклая сферическая крышка состоит из сферической части и приварного плоского фланца. При этом необходимо соблюдать следующие условия: 1) расстояние t , измеряемое в проекции на поперечное сечение корпуса аппарата, должно удовлетворять условию $t \geq 0,1D$; 2) половина угла сферического сегмента $\theta' = 50 - 80^\circ$; 3) расстояние между двумя соседними отверстиями, измеряемое по проекции на чертеже, должно быть не менее диаметра меньшего отверстия; 4) значения радиусов закругления $r \geq 0,4s_{\text{ex}}$, где s_{ex} — расчетная толщина стенки сферической части выпуклой крышки.

Половина угла сферического сегмента для срединной поверхности должна определяться по зависимости

$$\theta = \arcsin \left(\frac{D + \frac{s_{\text{ex}}}{2}}{2R + s_{\text{ex}}} \right) \quad (26.19)$$

Расчет применим для выпуклых сферических крышек при использовании уплотнений с двухконусными или дельтообразными кольцами.

Тогда исполнительная толщина сферической части выпуклой крышки определяется зависимостью

$$s_{\text{ex}} \geq \frac{1,25p_{\text{ex}} \cdot R}{2[\sigma] \cdot \varphi - 0,5p_{\text{ex}}} + c. \quad (26.20)$$

Исполнительная толщина фланцевого кольца

$$H_{\text{ex}} \geq 2 \cdot k \cdot \frac{M \cdot [\sigma]}{\sqrt{([\sigma] \cdot k^2 - p_{\text{ex}}^2)(D_{\text{ex}} - D_{\text{cp}} - 2d_{\text{ex}})}} + c, \quad (26.21)$$

где значение коэффициента k рассчитывается по зависимости

$$k = 1, \frac{D_{\text{ex}} - d_{\text{ex}}}{D} + \frac{D_{\text{ex}} + d_{\text{ex}}}{D_{\text{ex}} - d_{\text{ex}}} \cdot l, \frac{D_{\text{ex}}}{D_{\text{ex}} + d_{\text{ex}}}. \quad (26.22)$$

Допускаемое напряжение $[\sigma]$ в формулах (26.20) и (26.21) принимается наименьшим из двух значений: допускаемого напряжения $[\sigma]_{\text{ср}}$ материала сферической части и допускаемого напряжения $[\sigma]_{\text{ср}}$ материала фланца крышки при расчетной температуре.

Расчетный изгибающий момент M в диаметральном сечении определяется как для фланца, соединенного с цилиндром.

26.4. Примеры

26.4.1. Определить допускаемое напряжение для материала корпуса аппарата синтеза метанола.

Исходные данные. Материал — сталь 20Х2М, температура среды в аппарате $t_c = 200^\circ\text{C}$, температура теплоносителя в рубашке $t_u = 250^\circ\text{C}$.

Решение. За расчетную принимаем максимальную температуру стенки корпуса, равную температуре теплоносителя: $t = t_u = 250^\circ\text{C}$.

Нормативное допускаемое напряжение согласно (26.2) при $\sigma_s = 415 \text{ МПа}$, $\sigma_t = 368 \text{ МПа}$ для используемой стали при $t = 250^\circ\text{C}$

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_s / n_s}{n_t} = 530/2,4 = 221 \text{ МПа}, \frac{\sigma_t / n_t}{n_s} = 380/1,5 = 253 \text{ МПа} \right\} = 221 \text{ МПа.}$$

26.4.2. Произвести расчет на прочность цилиндрической обечайки аппарата, предназначенного для осушки воздуха.

Исходные данные. Внутреннее давление $p = 28 \text{ МПа}$, температура среды в аппарате $t_c = 180^\circ\text{C}$, температура теплоносителя в рубашке $t_u = 220^\circ\text{C}$, а давление пренебрежимо мало; внутренний диаметр аппарата $D = 1000 \text{ мм}$; материал корпуса — сталь 20Х2МА; скорость коррозии внутренней стороны корпуса $P_i = 0,048 \text{ мм/год}$, наружной стороны корпуса $P_o = 0,002 \text{ мм/год}$, срок службы аппарата $\tau = 20 \text{ лет}$.

Решение. Расчетное давление $p_r = p = 28 \text{ МПа}$.

Расчетная температура стенки аппарата равна максимальной температуре $t = t_u = 220^\circ\text{C}$.

Допускаемое напряжение $[\sigma] = 184 \text{ МПа}$.

Коэффициент прочности сварных продольных швов для хромомолибденовых сталей $\phi = 1,0$.

Прибавка к расчетной толщине на компенсацию коррозии

$$c = (P_i + P_o) \tau = (0,002 + 0,048) 20 = 1,0 \text{ мм.}$$

Расчетный коэффициент толстостенности

$$\ln \beta_r = p_r / ([\sigma]) = 28 / (184 \cdot 1) = 0,152,$$

откуда $\beta_r = 1,164$.

Исполнительная толщина обечайки

$$s \geq 0,5D(\beta_r - 1) + c = 0,5 \cdot 1,0 (1,164 - 1) + 0,001 = 0,083 \text{ м.}$$

По ГОСТ 19903—74 выбираем ближайшее большее значение $s = 0,085 \text{ м} = 85 \text{ мм}$.

Допускаемое рабочее давление

$$[p] = [\sigma] \ln \beta = 184 \cdot \ln 1,168 = 28,6 \text{ МПа,}$$

где $\beta = (D + 2s)/(D + 2c) = (1 + 2 \cdot 0,085)/(1 + 2 \cdot 0,001) = 1,168$.

Приняв температуры внутренней t_c и наружной t_u поверхностей обечайки соответственно равными температуре обрабатываемой среды в аппарате и теплоносителя в рубашке $t_c = 180^\circ\text{C}$ и $t_u = 220^\circ\text{C}$, получим $\Delta t = t_u - t_c = 220 - 180 = -40^\circ\text{C}$.

Эквивалентное напряжение рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p^2 + 3pk_2 \Delta t + k_2^2 \Delta t^2}$$

Значение коэффициента k_2 будет иметь следующее значение:

$$k_2 = \frac{\alpha E}{1 - \mu} \left(\frac{\beta^2 - 1}{2\beta^2 \ln \beta} - 1 \right) = \\ = \frac{12,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5}{1 - 0,3} \left(\frac{1,168^2 - 1}{2 \cdot 1,168^2 \cdot \ln 1,168} - 1 \right) = -0,47,$$

где $\mu = 0,3$; $\alpha = 12,9 \cdot 10^{-6} 1/\text{ }^\circ\text{C}$; $E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Тогда получим следующее значение эквивалентного напряжения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1,168^2}{1,168^2 - 1} \sqrt{3 \cdot 28^2 + 3 \cdot 28 (-0,47) (-40) + (-0,47)^2 (-40)^2} = 65,5 \text{ МПа.}$$

Таким образом, условие прочности: $\sigma_{\text{экв}} < \sigma / 1,1$; $65,5 < 382 / 1,1$ выполняется. При этом $p < [p]$; $28 < 28,6$, тем самым обеспечивается прочность обечайки в рабочем состоянии.

26.4.3. Рассчитать толщину стенки многослойной обечайки маслоделителя.

Исходные данные. Внутреннее давление $p = 32 \text{ МПа}$, температура среды в аппарате $t_c = 200^\circ\text{C}$, внутренний диаметр обечайки $D = 800 \text{ мм}$, толщина слоя многослойной обечайки $s_{\text{об}}$ = 6 мм, расположение слоев — концентрическое, материал обечайки — сталь 09Г2С, скорость коррозии с внутренней стороны корпуса $P = 0,04 \text{ мм/год}$, срок службы аппарата $\tau = 15 \text{ лет}$, среда пожаровзрывобезопасна и нетоксична.

Решение. Расчетное давление $p_k = p = 32 \text{ МПа}$.

Расчетную температуру стенки принимаем равной температуре рабочей среды $t = t_c = 200^\circ\text{C}$.

Допускаемое напряжение для каждого из слоев

$$[\sigma] = 188 \text{ МПа},$$

где i — номер слоя многослойной обечайки.

Для многослойной обечайки (рис. 26.41) с концентрическим расположением слоев согласно (26.5)

$$[\sigma] = \sum_i^n [\sigma]_i s_i / \sum_i s_i.$$

По условиям $s_1 = s_2 = \dots = s_i = s_n$. Так как материал слоев одинаков, то $[\sigma] = [\sigma]_1 = \dots = [\sigma]_i = [\sigma]_n = 188 \text{ МПа}$.

Расчетный коэффициент толстостенности определяем из формулы (26.1):

$$\ln \beta_R = p / ([\sigma]) = 32 / 188 = 0,1702,$$

откуда $\beta_R = 1,185$.

Расчетная толщина многослойной обечайки

$$s_R = 0,5D(\beta_R - 1) = 0,5 \cdot 0,8(1,185 - 1) = 0,074 \text{ м} = 74 \text{ мм.}$$

Прибавка к расчетной толщине обечайки на компенсацию коррозии

$$c = P \tau = 0,04 \cdot 15 = 0,6 \text{ мм.}$$

Необходимое число слоев

$$n \geq (s_R + c) / s_{\text{об}} = (74 + 0,6) / 6 = 12,4.$$

Окончательно принимаем $n = 13$.

26.4.4. Для маслоделителя, работающего под внутренним давлением $p_i = 20 \text{ МПа}$, определить основные геометрические размеры кованого плоского отбортованного днища, имеющего центральное отверстие.

Исходные данные. Температура среды в аппарате $t_c = 380^\circ\text{C}$, диаметр аппарата $D = 400 \text{ мм}$, диаметр одиночного отверстия в днище $d_o = 60 \text{ мм}$, материал аппарата — сталь 20 с допускаемым напряжением при заданной температуре $[\sigma] = 106 \text{ МПа}$, коэффициент прочности сварных соединений $\Phi = 1$, прибавка $c = 2 \text{ мм}$.

Решение. Коэффициент ослабления днища отверстиями в случае одиночного центрального отверстия согласно (26.10)

$$\Phi_0 = \frac{1}{1 + d_o/D + (d_o/D)^2} = \frac{1}{1 + 0,06/0,4 + (0,06/0,4)^2} = 0,85.$$

Расчетная толщина днища по формуле (26.8)

$$s_{\text{дк}} = 0,45D \sqrt{p_k / ([\sigma] \Phi_0)} = 0,45 \cdot 0,4 \sqrt{20 / (106 \cdot 0,85)} = 0,085 \text{ м.}$$

Исполнительная толщина днища

$$s_d \geq s_{\text{дк}} + c = 0,085 + 0,002 = 0,087 \text{ м.}$$

По ГОСТ 19903—74 принимаем $s_d = 0,09 \text{ м} = 90 \text{ мм}$.

Допускаемое рабочее давление согласно (26.12)

$$[p]_d = 5(s_d - c)^2 [\sigma] \psi / D^2 = 5(0,09 - 0,002)^2 \cdot 106 \cdot 0,85 / 0,4^2 = 22,2 \text{ МПа.}$$

Таким образом, $p_i < [p]$; $20 \text{ МПа} < 22,2 \text{ МПа}$.

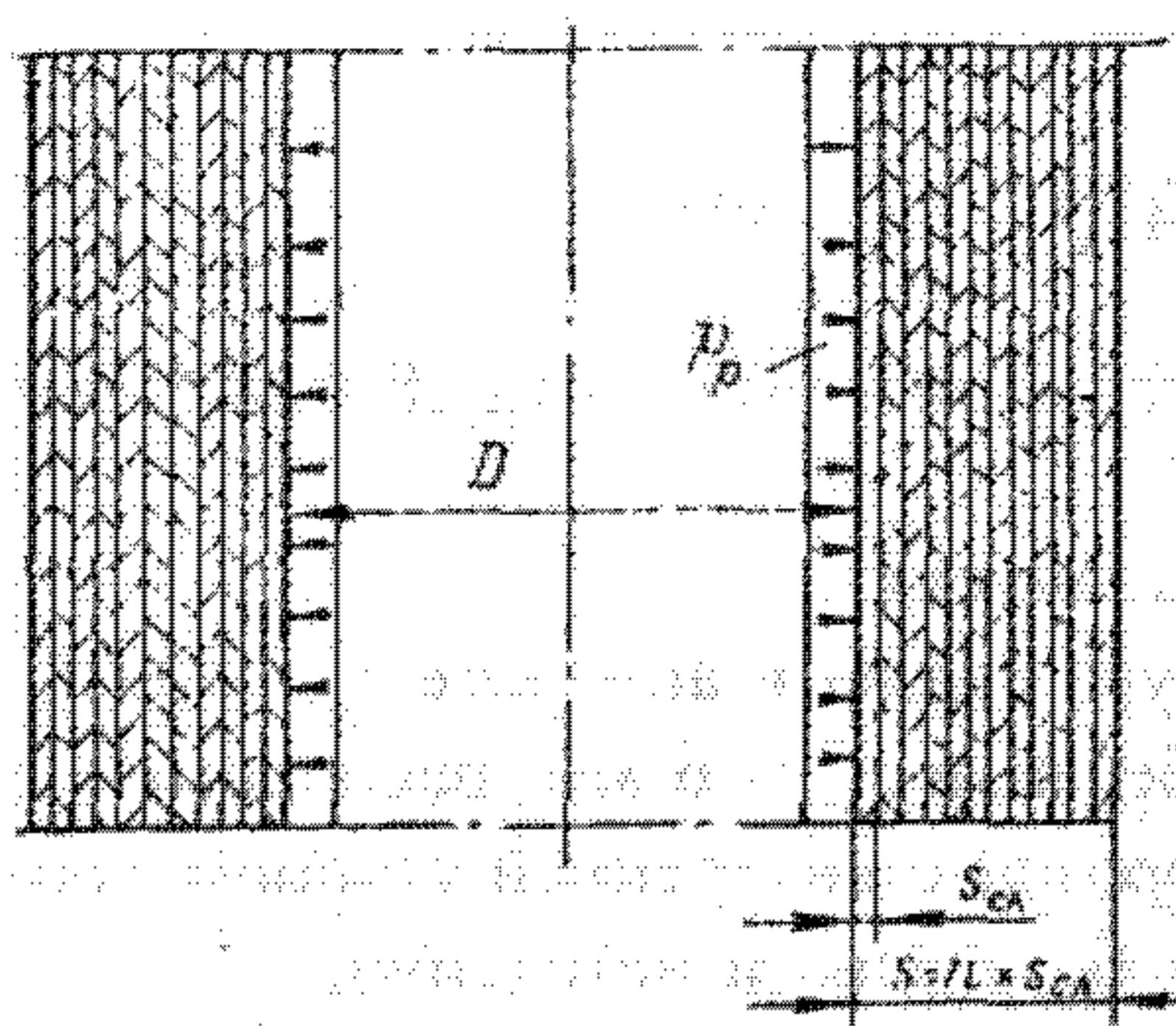


Рис. 26.41. Расчетная схема многослойной обечайки

Расчетный коэффициент толстостенности для цилиндрической части отбортованного днища определим из выражения

$$\ln \beta_R = p_R / ([\sigma]) = 20 / (106) = 0,169,$$

откуда $\beta_R = 1,185$.

Исполнительная толщина цилиндрической части отбортованного днища $s \geq 0,5D (\beta_R - 1) + c = 0,5 \cdot 0,4 (1,185 - 1) + 0,002 = 0,039 \text{ м} = 39 \text{ мм}$. Принимаем согласно ГОСТ 19903—74 $s = 40 \text{ мм}$.

Остальные геометрические размеры днища (рис. 26.42) при расчетной толщине $s_R = 0,5D (\beta_R - 1) = 0,5 \cdot 0,4 (1,185 - 1) = 37 \text{ мм}$ следующие: $r \geq s_R = 37 \text{ мм}$; $r_1 \geq 1,8s_R = 1,8 \cdot 37 = 67 \text{ мм}$; $h_1 \geq 1,8s_R = 1,8 \cdot 37 = 67 \text{ мм}$; $h_2 \geq s_p = 37 \text{ мм}$. Окончательно принимаем: $r = 40 \text{ мм}$; $r_1 = 70 \text{ мм}$; $h_1 = 70 \text{ мм}$; $h_2 = 40 \text{ мм}$.

26.4.6. Для аппарата синтеза аммиака рассчитать толщину сферического днища (см. рис. 26.38, а).

Исходные данные. Внутреннее давление $p_R = 35 \text{ МПа}$, внутренний диаметр аппарата $D = 1200 \text{ мм}$, температура стенки (расчетная) $t = 300^\circ\text{C}$, внутренняя высота выпуклой части днища $H_1 = 300 \text{ мм}$, материал днища — сталь 20Х2МА, прибавка $c = 2 \text{ мм}$, $[\sigma] = 169 \text{ МПа}$.

Решение. Так как выполняется условие $H_1/D \geq 0,25$; $(0,3/1,2 = 0,25)$, то днище является выпуклым.

Расчетная толщина выпуклого сферического днища по формуле (26.13)

$$s_{BR} = \frac{p_R D}{4 [\sigma] \Phi - p_R} \frac{D}{2H_1} = \frac{35 \cdot 1,2}{4 \cdot 169 \cdot 0,9 - 35} \frac{1,2}{2 \cdot 0,3} = 0,146 \text{ м.}$$

Исполнительная толщина днища $s_* \geq s_{BR} + c = 0,146 + 0,002 = 0,148 \text{ м}$. По ГОСТ 19903—74 принимаем $s_* = 0,15 \text{ м} = 150 \text{ мм}$.

Для выпуклого днища необходимо выполнение условия $(s_* - c)/D \leq 0,15$; $(0,15 + 0,002)/1,2 = 0,123$; $0,123 < 0,15$, следовательно, условие выполняется.

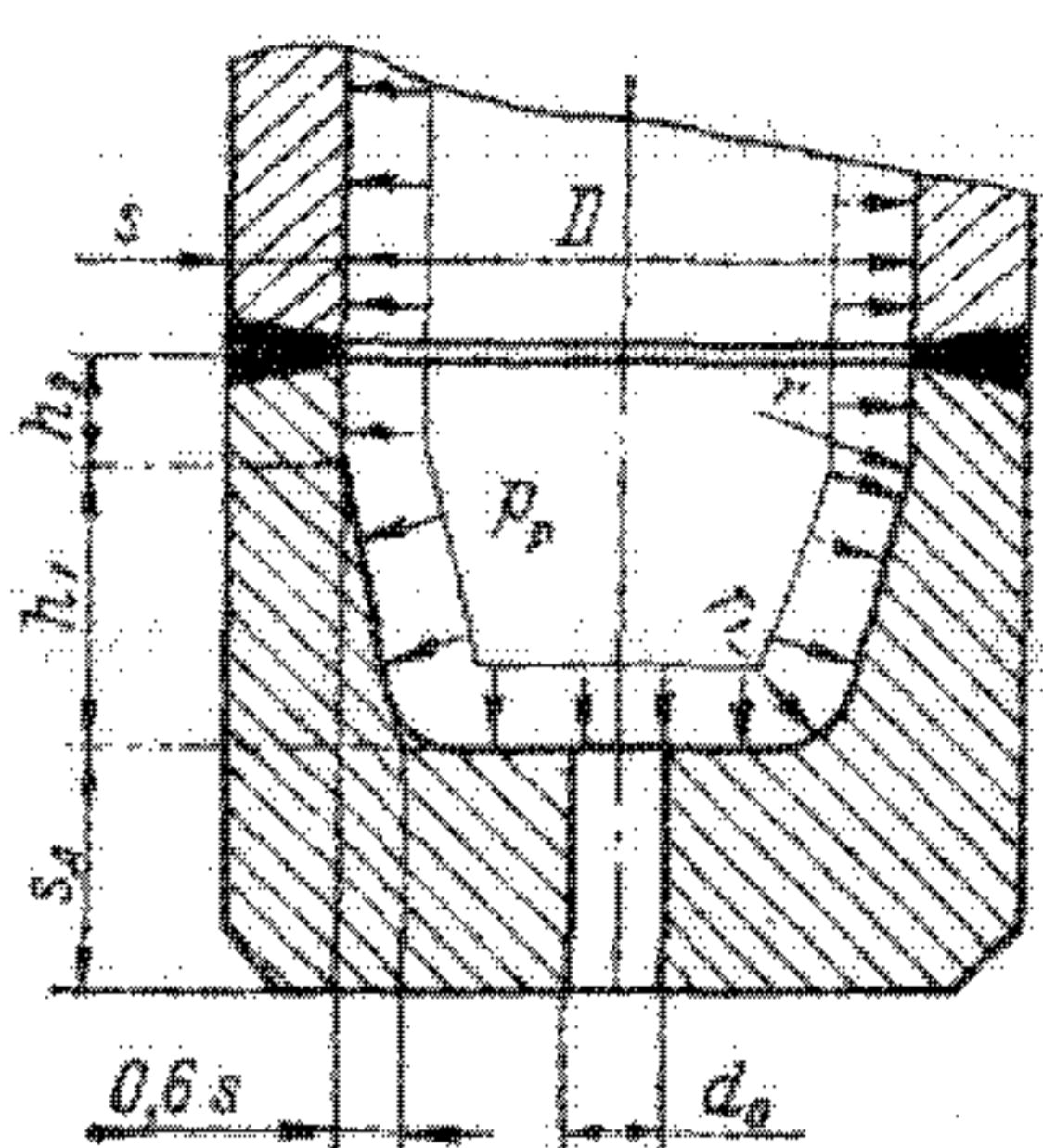


Рис. 26.42. Расчетная схема плоского отбортованного днища