

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТРУБИ І ОБОЛОНКИ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ ТЕРМОМЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Представлено результати розрахункової оцінки напружено-деформованого стану товстостінної циліндричної труби і оболонки при ступінчастій зміні тиску і температури на внутрішній поверхні. Показано, що на цій поверхні максимальна напруженість виникає в початковий період охолодження. Рівень напружень визначається сумою ефектів, викликаних зниженням температури і зміною тиску.

Наведено аналіз спільного впливу ступінчастої зміни температури і тиску на коефіцієнт інтенсивності напружень K_I труби з осьового крайовою тріщиною, прилеглою до внутрішньої поверхні.

Оцінка та прогнозування опору крихкому руйнуванню великомасштабних оболонок (наприклад, корпусів реактора АЕС) представляють значний практичний інтерес. Дослідження властивостей металу корпусу реактора достатньо широко представлені, наприклад, в роботах [1-5]. Питання кінетики напружено-деформованого стану (НДС) корпусу реактора і оцінки його опору руйнуванню за наявності тріщин в умовах нестационарних режимів навантаження, викликаних швидкою (ступінчастою) зміною температури і тиску освітлені у меншій мірі. Це пояснюється складністю і трудомісткістю рішення зв'язаної задачі про нестационарне термомеханічне навантаження оболонки корпусу реактора з тріщиною. Разом з тим задача є актуальною, оскільки вказані нестационарні режими мають місце при аварійних ситуаціях, таких, наприклад, як PTS (Pressurized Thermal Shock) - аварійний режим (термомеханічний удар), при якому аварійне охолодження реактора викликає значне підвищення тиску в корпусі реактора; або LOCA (Loss of Coolant Accident) - аварійний режим з великим витокм теплоносія, при якому в процесі аварійного охолодження реактора не забезпечується підтримка робочого тиску теплоносія і він різке падає.

Основні особливості кінетики нестационарного НДС в оболонці в залежності від параметрів термомеханічного навантаження найпростіше визначити за результатами досліджень її спрощеної моделі – циліндричної труби. Такі результати можуть служити основою для розробки методів оцінки допустимих, з точки зору критеріїв опору крихкому руйнуванню, режимів охолодження і зміни тиску.

У даному повідомленні представлено деякі результати розрахункової оцінки НДС циліндричної труби і замкнутої оболонки (циліндричної труби із заглушками) при швидкому (стрибкоподібному) пониженні температури і зміні тиску на їх внутрішній поверхні. Показаний істотний вплив на рівень максимальних напружень процесу коливань оболонки.

Розрахункові схеми. Чисельні розрахунки НДС довгої циліндричної труби і оболонки у вигляді ділянки циліндричної труби із заглушками при термосиловому навантаженні виконані з використанням методу скінчених елементів [6, 7].

НДС труби (зовнішній діаметр $D = 4000$ мм, товщина стінки $\delta = 200$ мм) розраховано для ступінчастої зміни температури та тиску, і наступних умов:

- початкові переміщення, напруження і температура в стінці труби – нульові;
- граничні умови – нульове переміщення в осьовому напрямі;
- навантаження – ступінчасте зниження температури ΔT і тиску Δp на внутрішній поверхні труби, постійні при подальшому процесі навантаження;
- тепловідвід із зовнішньої поверхні труби не враховується.

НДС оболонки (ділянка циліндричної труби з плоскими заглушками на торцях із зовнішнім діаметром $D = 4000$ мм, завдовжки 12000 мм та товщиною стінки $\delta = 200$ мм) розраховано для нульових початкових умов і ступінчастої зміни температури і тиску, аналогічних використаним при розрахунку НДС труби.

Розрахунки виконані для труби і оболонки з лінійно-пружного матеріалу. Приймали, що модуль Юнга $E = 200$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,29$, об'ємна теплоємність $C_v = 3,6$ МДж/(м³·К), теплопровідність $\lambda = 37$ Дж/(м·с·К), коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/°С, $\rho = 7800$ кг/м³. Залежністю характеристик пружності і теплофізичних характеристик від температури нехтували.

НДС труби. Розрахунки виконані для осесиметричного НДС, що відповідає плоскій деформації. Аналіз результатів розрахунків дозволяє зробити висновки про наступне.

При зниженні температури внутрішньої поверхні труби на величину ΔT :

- у початковий період охолодження (після ступінчастого зниження температури) в шарі металу, прилеглому до внутрішньої поверхні труби, виникає плоский напружений стан з максимальним рівнем термонапружень, рівень яких

$$\sigma_{\max}^T = \Delta T \alpha E / (1 - \nu) \quad (1)$$

відповідає $\sigma_{\max}^T / \Delta T = 3,52$ МПа/°С для труби з приведеними вище характеристиками пружності;

- розповсюдження області охолодження по металу з часом викликає зниження рівня термонапружень на внутрішній поверхні труби, і його підвищення на віддаленні від неї протягом достатньо тривалого періоду з характерним часом вирівнювання температури $t_c \approx \delta^2 C_v / \lambda$, яке для труби вибраних розмірів складає величину $t_c \approx 3900$ с.
- максимальний рівень термонапружень на внутрішній поверхні труби знижується із зростанням тривалості t_n пониження температури. Для труби вибраних розмірів при $t_n \approx 100$ с величина $\sigma_{\max}^T / \Delta T$ приблизно на 10% нижча, ніж при ступінчастій зміні температури;
- зниження температури по товщині стінки труби при великій її тривалості не викликає істотного нестационарного НДС, у зв'язку з чим нестационарністю НДС при аналізі температурної дії допустимо нехтувати.

При ступінчастій зміні тиску на внутрішній поверхні труби на величину Δp :

- виникають радіальні коливання стінки труби з періодом коливань $k \approx \pi D_m / c_0 = 2,36$ мс (D_m – серединний діаметр труби, c_0 – швидкість звуку в металі, $c_0^2 = E / \rho$).
- максимальні окружні напруження розтягування в стінці труби, пов'язані з її коливаннями виникають у момент її максимального радіального розширення; рівень цих напружень рівний подвоєній величині напружень, викликаних статичною дією тиску Δp

$$\sigma_{\theta}^{\Delta p} = 2 \cdot \Delta p \cdot \left(\frac{D}{2\delta} - 1 \right) / (1 - \nu^2). \quad (2)$$

При одночасній ступінчастій зміні тиску і температури на внутрішній поверхні труби:

- термічні напруження на внутрішній поверхні труби упродовж значної кількості циклів радіальних коливань практично не змінюються, а максимальні напруження біля цієї поверхні визначаються сумою термонапружень, викликаних охолодженням, напружень, викликаних статичною дією тиску p , і напружень, викликаних ступінчастою зміною тиску на величину Δp , див. залежність (2) (стрибок тиску викликає коливання труби і збільшує максимальну напруженість, як при підвищенні тиску, так і при його зниженні);
- на відстані від охолоджуваної поверхні рівень максимальних напружень нижчий, ніж на самій поверхні внаслідок зниженого рівня термонапружень, і в початковий період охолодження визначається тільки зміною тиску (рис. 1).

За результатами чисельних розрахунків (рис.1) максимальний рівень напружень біля внутрішньої поверхні труби, викликаний ступінчастими зниженням температури на $\Delta T = -40^\circ\text{C}$ і зміною тиску з 5,0 МПа до нуля, складає величину $\sigma_\theta^{\max} \approx 233$ МПа, що відповідає сумі термічної складової напружень $\sigma_\theta^T \approx 141$ МПа і напружень, викликаних коливаннями оболонки, $\sigma_\theta^{\Delta P} \approx 98$ МПа, які можна розрахувати з використанням залежностей (1) і (2).

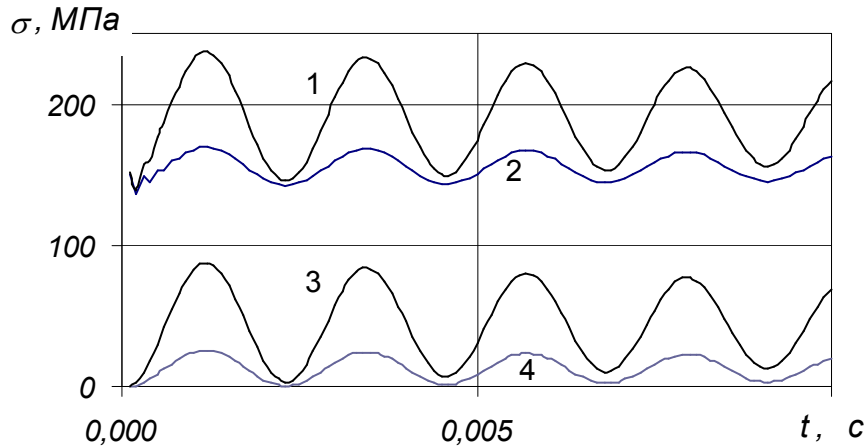


Рис. 1. Зміна в часі напружень σ_θ (1) та σ_z (2) на внутрішній поверхні труби (3) і на відстані 100 мм від неї (4), викликані ступінчастим зменшенням температури і тиску ($\Delta T = -40^\circ\text{C}$, $\Delta p = 5,0$ МПа) на внутрішній поверхні труби.

НДС циліндричної оболонки. Деякі результати розрахунків приведені на рис.2. З їх аналізу виходить, що на ділянці металу, прилеглої до внутрішньої поверхні оболонки, в початковий період охолодження (після ступінчастого зниження температури на $\Delta T = -40^\circ\text{C}$) виникає нестационарний плоский напружений стан (нульові напруження в радіальному напрямі) такий же, як і в довгій трубі.

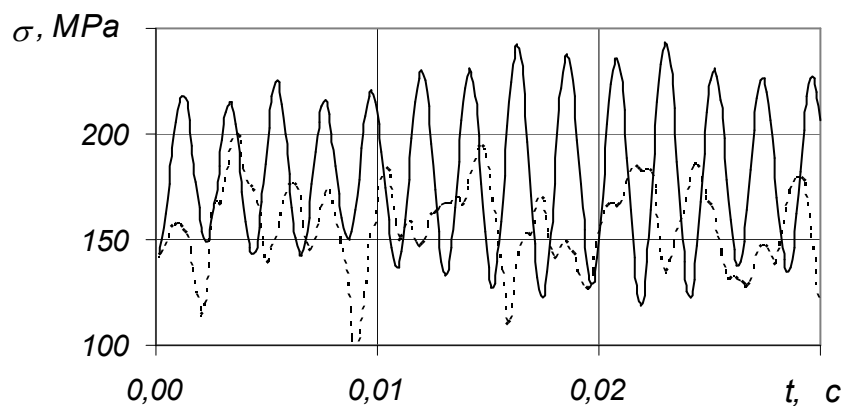


Рис. 2. Зміна в часі осьових σ_z (пунктирна лінія) та окружних σ_θ (суцільна лінія) напружень на внутрішній поверхні оболонки, посередині її твірної при $\Delta T = -40^\circ\text{C}$, $\Delta p = 5,0$ МПа.

Ступінчаста зміна тиску (з 5,0 МПа до нуля) викликає циклічну зміну напружень в стінці циліндричної ділянки оболонки в результаті інтерференції радіальних і подовжніх коливань. Частота зміни напружень (рис.2) відповідає радіальним

коливанням труби (циліндричної частини оболонки). Подовжні коливання порушують гармонійний характер зміни напружень і викликають деяке підвищення максимальних напружень.

В реальних оболонках з товщиною стінки, що змінюється, з різного роду відхиленнями (типу локальних потовщень, патрубків та ін.) від простої осесиметричної форми виникає набагато складніший нестационарний напружений стан, який вимагає додаткового вивчення.

Термомеханічне навантаження труби з тріщиною. Основні результати розрахунків для осевих крайових тріщин глибиною $a = \delta/24, \delta/12, \delta/6, \delta/3$, прилеглих до внутрішньої поверхні труби вказаних вище розмірів, наведено на рис.3. Як слідує з розрахунків збільшення глибини тріщини впливає на залежність $K_I(t)$ в процесі охолодження. За початковим періодом охолодження тривалістю t_{max} , протягом якого коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) зростає до максимальної величини $K_{I_{max}}$, слідує його плавне пониження, причому t_{max} і $K_{I_{max}}$ залежать від глибини тріщини.

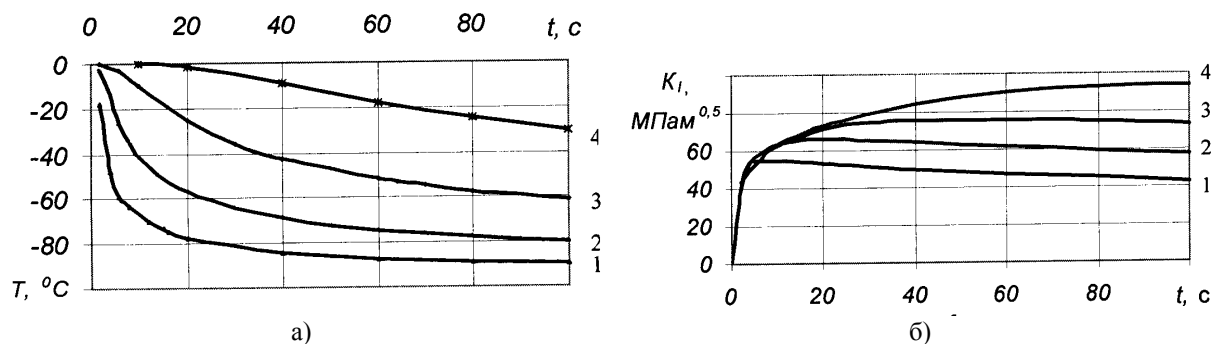


Рис. 3. Зміна в часі температури (а) та коефіцієнта інтенсивності напружень (б) тріщини різної глибини при ступінчастому зниженні температури на внутрішній поверхні труби на величину $\Delta T = -100^\circ C$:
1 - $a = \delta/24$, 2 - $a = \delta/12$, 3 - $a = \delta/6$, 4 - $a = \delta/3$.

При збільшенні глибини тріщини, внаслідок підростання (проскакування) при підвищенні K_I до критичного значення, відповідного глибині тріщини a і температурі в її вершині T_a , КІН в вершині тріщини зростає. Отже, запобігання руйнуванню за наявності тріщини забезпечується при виконанні умови, яка враховує вплив довжини тріщини і температури в області її фронту:

$$K_{I_{max}}(T_a, a) < K_{Ic}(T_a).$$

Зазначимо, що при аналізі поведінки конструкції з тріщиною з використанням наведеної вище умови може виявитися, що тріщина більшої глибини буде знаходитися в стійкішому (більш безпечному) стані внаслідок того, що температура в її вершині буде вище і відповідно, в'язкість руйнування металу також буде вища, див. рис.3. Отже, запас за температурою в'язко-крихкого переходу для такої тріщини може бути вищим.

При локальному охолодженні внутрішньої поверхні частини труби в області тріщини рівень $K_{I_{max}}$ значно нижче ніж при охолодженні всієї її внутрішньої поверхні. Так, при ступінчастому охолодженні 1/10 циліндричної частини поверхні оболонки з розміщеною там тріщиною, КІН для тріщини глибиною $\delta/12$ знижується приблизно в 2,5 рази.

Зміна КІН. Враховуючи однозначний зв'язок між напруженнями та КІН при навантаженні внутрішнім тиском труби (оболонки) з осовою тріщиною при ступінчастій зміні тиску на внутрішній поверхні циліндричної труби (оболонки) з осовою крайовою тріщиною, прилеглою до внутрішньої поверхні труби, виникає циклічна величини КІН відносно його середнього значення, яка відповідає зміненому значенню тиску, див. рис.4. При сумісній дії ступінчастого охолодження та зміни тиску

максимальна величина K_I визначається сумою складових, викликаних охолодженням, статичним тиском p і коливаннями, викликаними ступінчастою зміною тиску на величину Δp .

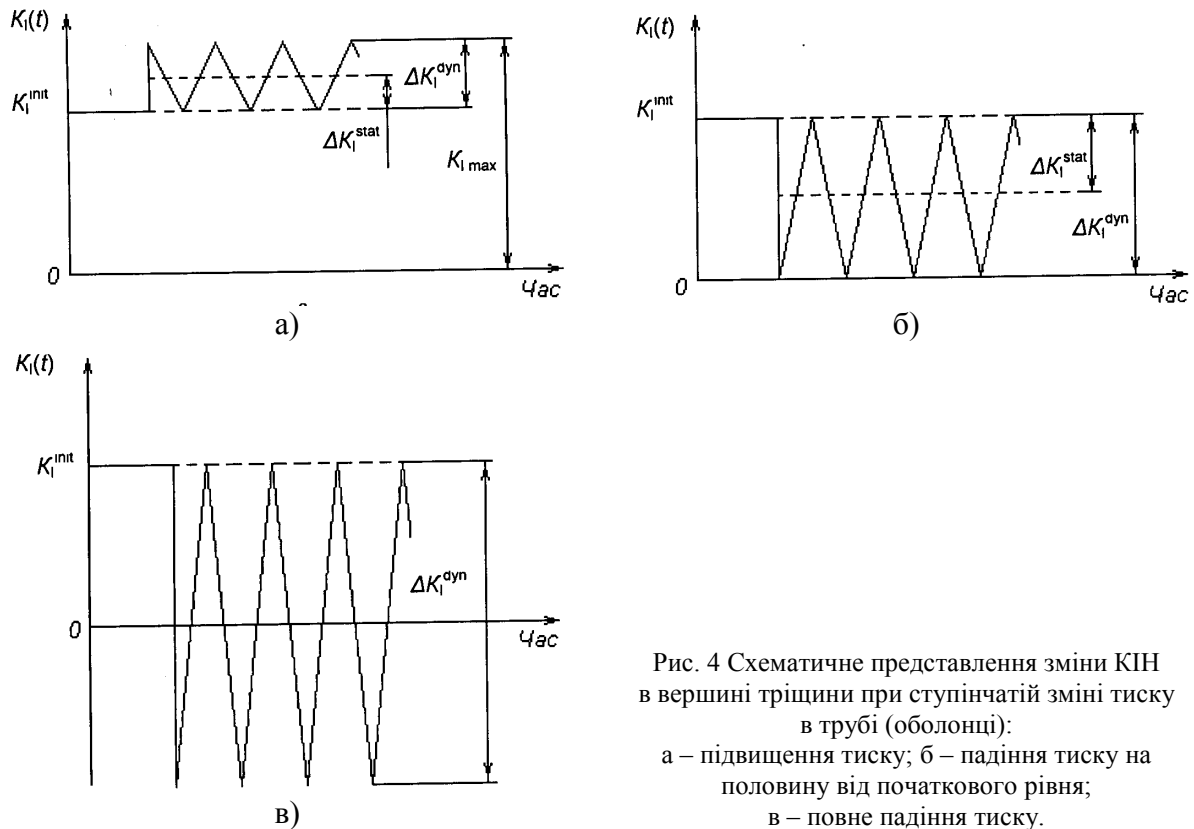


Рис. 4 Схематичне представлення зміни КІН в вершині тріщини при ступінчатій зміні тиску в трубі (оболонці):

а – підвищення тиску; б – падіння тиску на половину від початкового рівня; в – повне падіння тиску.

Ступінчаста зміна тиску на внутрішній поверхні труби (оболонки) з тріщиною викликає циклічну зміну КІН в вершині тріщини з періодом, що дорівнює періоду радіальних коливань труби. Підвищення коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I^{dyn} дорівнює подвоєній величині приросту КІН внаслідок зміни тиску на величину Δp при статичному навантаженні ΔK_I^{stat} : $\Delta K_I^{\text{dyn}} = 2\Delta K_I^{\text{stat}}$.

Відповідно до викладеного, умова нерозповсюдження тріщини в початково навантаженій статичним тиском трубі (оболонці) для ступінчастого охолодження і ступінчастого підвищення тиску Δp , слід приймати в вигляді:

$$K_I^{\text{max}} = K_I^T + K_I^{\text{init}} + \Delta K_I^{\text{dyn}} = K_I^T + K_I^{\text{init}} + 2\Delta K_I^{\text{stat}} < K_{IC},$$

де K_I^T та K_I^{init} - КІН, викликані зниженням температури та дією початкового тиску відповідно (рис. 4, а).

Аналогічно, для ступінчастого зниження тиску на величину Δp умову нерозповсюдження тріщини можна записати в вигляді:

$$K_I^{\text{max}} = K_I^T + K_I^{\text{init}} < K_{IC},$$

оскільки зниження значення КІН від початкової величини K_I^{init} компенсується періодичним відновленням його значення внаслідок радіальних коливань труби (рис.4, б). Таким чином, навіть при повному падінні тиску в трубі (оболонці) до нульового рівня, внаслідок її коливань рівень КІН від дії тиску протягом деякого часу періодично досягатиме початкового рівня K_I^{init} , див. рис.4, в. Відзначимо, що наведені вище співвідношення для КІН відповідають пологим тріщинам з великим відношенням їх довжини до глибини, $c/a \gg 1$.

Висновки. При швидкому охолодженні внутрішньої поверхні циліндричної труби (оболонки) в ній виникає нестационарний осесиметричний НДС з максимальним рівнем термонапружень в початковий період.

Коливання труби (оболонки), викликані швидкою зміною тиску на її внутрішній поверхні, викликають нестационарний НДС з максимальним рівнем розтягуючих напружень в момент, який відповідає максимальному розширенню оболонки в радіальному напрямі.

Максимальний рівень тангенціальних напружень в оболонці визначається сумою максимального рівня термонапружень та рівня напружень, викликаних дією тиску і коливаннями оболонки.

При швидкому охолодженні внутрішньої поверхні труби (оболонки) з крайовою тріщиною збільшення глибини тріщини підвищує максимальне значення термічної складової коефіцієнта інтенсивності напружень K_I в вершині тріщини, проте запас по температурі в'язко-крихкого переходу для тріщини більшої глибини може бути вищим внаслідок підвищеної температури в її вершині.

Швидке падіння тиску в трубі (оболонці) тривалий час супроводжується циклічною зміною КІН в вершині тріщини, максимальні значення якого досягають початкового рівня (до падіння тиску).

При локальному охолодженні внутрішньої поверхні оболонки в області тріщини рівень КІН в її вершині значно нижче ніж при охолодженні всієї її внутрішньої поверхні.

Для уточненої оцінки НДС і кінетики КІН в вершині тріщини необхідно враховувати конструктивні особливості оболонки, реальні режими її термомеханічного навантаження та вплив теплоносія, що є завданням подальших досліджень.

Results of estimations of the stress-strain state of thick-wall cylindrical tube and shell under stepwise change of pressure and temperature on their inner surface are presented. It is shown that maximum stress level on the surface occurs in the beginning period of cooling. Stress level depends on temperature drop and pressure change.

Analysis of joint influence of stepwise change of pressure and temperature on stress intensity factor K_I in the tube with axle edge crack on the inner surface is presented.

Література

1. Трошенко В.Т., Покровский В.В., Каплуненко В.Г. Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых с талей с учетом влияния размеров образцов. Сообщения 1-4 // Пробл. прочности.- 1997.-№ 1, 2, 3.- с. 5-25, с.5-19, с. 21-31, с. 39-54.
2. Марголин Б.З., Швецова В.А., Гуленко А.Г. Прогнозирование трещиностойкости при хрупком разрушении корпусных реакторных сталей, подвергнутых нейтронному облучению // Там же.- 2001.- №2, 3.-С. 5-17, С. 5-12.
3. Марголин Б.З., Костылев В.И. Прогнозирование трещиностойкости при вязком разрушении корпусных реакторных сталей, подвергнутых нейтронному облучению // Там же.- 2001.-№4, 5.-С. 25-33, С. 5-17.
4. Марголин Б.З., Швецова В.А., Гуленко А.Г. и др. Прогнозирование трещиностойкости корпусной реакторной стали на основе концепции «Master curve» и вероятностной модели// Там же.- 2002.-№1.-С. 5-21.
5. Гриник Э.У., Чирко Л.И., Гульчук Ю.С. и др. Радиационное охрупчивание корпусной стали реакторов ВВЭР-440, находящейся под нагрузкой// Там же.- 2003.-№1.-С. 39-47.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975.- 541 с.
7. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. - М.: Наука, 1980.- 254 с.

Одержано 14. 07.2004 р.