

уровня P_i до уровня P_{i+1} ; $C_{дор1}(P_{i+1})$ — экономические затраты на доработку ЖРД с целью повышения его надежности; $\Phi(P_i)$ — вероятность отсутствия отказов ЖРД с уровнем надежности P_i в серии из N_n пусков изделия.

Сумма всех нечетных членов выражения (7) характеризует математическое ожидание затрат на проектирование, конструкторскую отработку и повышение надежности двигателя, а сумма четных — характеризует математическое ожидание затрат на выполнение программы ЛИ и целевых пусков изделия.

На основе конкретизации общего выражения (7) для оценки суммарных экономических затрат применительно к особенностям двигателя и изделия в целом должна быть построена расчетная модель, позволяющая провести выбор оптимального по этому критерию значения $P_{опт}$.

В соответствии с выражением (3) уровень ВБР ЖРД однозначно связан с количеством проведенных испытаний двигателя. Это позволяет рассматривать число испытаний наряду с ВБР ЖРД в качестве оптимизируемого параметра.

При построении расчетной модели допускается упрощение общего выражения (7), в частности за счет сокращения числа учитываемых в нем дорабо-

ток двигателя в процессе выполнения программы ЛИ и целевых пусков изделия, если это не ведет к существенной потере точности определения критерия в районе его минимума.

Определение значений критерия по расчетной модели может выполняться либо методом прямого решения конкретизированного общего выражения (7), либо методом статистических испытаний построенной расчетной модели. Последний подход оправдан в случае, когда прямое решение связано с большими вычислительными трудностями.

1. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т., т. 6. Экспериментальная отработка и испытания / Под ред. Р. С. Судакова.—М.: Машиностроение, 1989.—376 с.
2. Проблемы надежности летательных аппаратов / Под ред. И. Ф. Образцова, А. С. Вольмира.—М.: Машиностроение, 1985.—276 с.

PARTICULARITY OF INVESTIGATION OF RELIABILITY FOR LIQUID ROCKET ENGINE DURING ITS PROJECTING

S. M. Podol'chak

Investigation of LRE reliability during its design and designer mining plays a significant part in security of rocket reliability. A necessary minimum level of LRE reliability can be defined as a result of an estimation and minimization of general costs on its creation and application, that is of the program fulfilment as a whole.

УДК 536.24+621.45

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ У МОБІЛЬНИХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ДВИГУННИХ УСТАНОВОК

© Л. В. Пронь, Л. Б. Кабакова

Дніпропетровський державний університет

Спроектована експериментальна установка для дослідження теплообміну в парогенеруючих установках для утилізації двигунних установок. Отримані експериментальні дані з кипіння води в щільному каналі.

При утилізації двигунних установок виникає необхідність у автономних парогенеруючих установках, властивістю яких має бути мобільність. У лабораторії теплових труб ДДУ розроблено і створено парогенератор нової конструкції, що являє собою великогабаритний замкнутий термосифон (ЗДТ) з рознесеними у просторі зонами нагрівання і конденсації з електричним нагріванням. Парогенератор забезпечує (одночасно з транспортом тепла) високоефективне перетворення електричної

енергії у теплову за рахунок оригінальної конструкції електродотів.

Парогенеруюча установка, зовнішній вигляд якої поданий на рис. 1, складається з нагрівального контура-випарника і теплообмінника-конденсатора. У свою чергу нагрівальний контур містить у собі електродотли (зона нагрівання термосифона), паровий колектор, газозбірник і компенсатор.

Конструктивно нагрівальний контур — це горизонтальний циліндричний паровий колектор, на

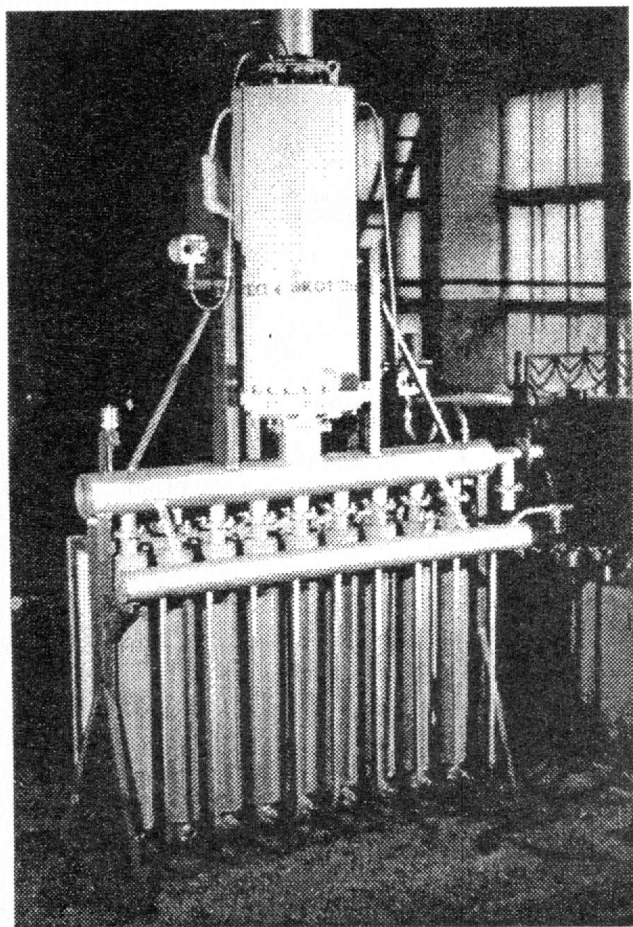


Рис. 1. Парогенеруюча установка

нижній твірній якого за допомогою ніпельних з'єднань закріплено електродкоти у вигляді циліндрів, на зовнішній поверхні яких змонтована система активно-індуктивного нагріву. При цьому, в залежності від кількості електродкотів і характеристик системи нагрівання кожного з них, сумарна потужність нагрівача може змінюватися від 30 до 200 кВт.

Паралельно з колектором встановлений компенсатор у виді горизонтально розташованої циліндричної ємкості. Компенсатор пов'язаний патрубками з паровим колектором, а також через опускні патрубки — безпосередньо з нижньою частиною електродкотів. У результаті колектор, електродкоти і компенсатор утворюють замкнутий контур у вигляді сполучених посудин, у яких здійснюється циркуляція теплоносія. При цьому в процесі роботи в електродкотлах зберігається незмінною висота стовпа рідини і забезпечується постійний напір біля 2 кПа у циркуляційному контурі. Утворювана в такий спосіб спрямована циркуляція теплоносія в електродкотлах забезпечує їхню стабільну стійку

роботу, а також значне (у 3—5 разів) збільшення граничного теплового потоку в термосифоні.

На паровому колекторі встановлено трубчастий газозбірник із системою сепарації і дренажу, призначені для збору і видалення незконденсованого газу із термосифонного контура.

Утворена при кипінні теплоносія в електродкотлах пара надходить у паровий колектор, де конденсується на теплообмінній поверхні. Конденсат стікає через компенсатор і опускні патрубки знову у електродкоти, створюючи замкнутий випарно-конденсаційний контур. Зонаю конденсації є теплообмінник-парогенератор у вигляді трубної дошки з 28 горизонтальними трубами діаметром 40—60 мм і довжиною 900 мм.

Зараз немає достатньо надійних дослідних даних і рекомендацій з розрахунку теплообміну у великогабаритних термосифонах із рознесеними у просторі зонами нагрівання і конденсації. Опубліковані емпіричні формули виведені за результатами досліджень у обмеженому діапазоні зміни геометричних і теплофізичних параметрів.

Немає надійних даних про щільності теплових потоків та коефіцієнти тепловіддачі для великогабаритних натурних термосифонів, тому доводиться істотно збільшувати коефіцієнти запасу, а це призводить до роботи теплообмінних зон в режимах, значно нижче оптимальних, і отже, — до збільшення габаритів і металоємності.

Одним із перспективних засобів інтенсифікації теплообміну є організація бульбашкового кипіння у вузькому щілинному каналі. Для цього застосовуються різноманітні вставки в зоні нагрівання. Вплив цих елементів на процеси теплообміну в термосифоні також досліджено недостатньо.

Для досліджень теплообміну при кипінні і конденсації у замкнутому двофазному термосифоні з рознесеними у просторі зонами нагрівання і конденсації була спроектована і виготовлена експериментальна установка, схема якої приведена на рис. 2. Установка складається з термосифонного контура, систем підведення і відведення тепла, заповнення термосифона проміжним теплоносієм і видалення газів, що не конденсуються, схеми вимірювання основних величин. Основним елементом установки є робоча камера 15 зони нагрівання ЗДТ, у якій відбувається кипіння. Конструкція експериментальної установки дозволяла проводити дослідження при одночасній роботі від однієї до трьох камер у залежності від необхідної щільності теплового потоку в зоні конденсації. Безпосередньо над робочою камерою розташована камера конденсації 16, що забезпечувала повне повернення конденсату через бак постійного рівня 14 і опускні

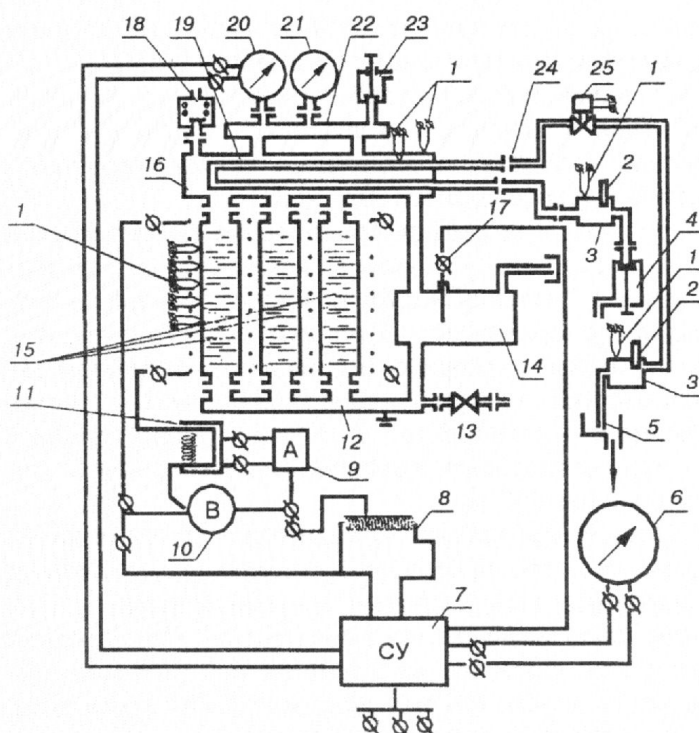


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 — термопара, 2 — розширювальний бак, 4 — регулятор витрати води, 5 — мірна ємність, 6 — термометр опору, 7 — автоматична система керування, 8 — автотрансформатор, 9 — амперметр, 10 — вольтметр, 11 — трансформатор струму, 12 — опускні патрубки, 13 — клапан, 14 — бак постійного рівня, 15 — робочі камери зони нагрівання, 16 — камера конденсації зони охолодження, 17 — датчик рівня, 18 — дренажно-захисний клапан, 19 — трубний пучок конденсатора ЗДТ, 20 — електроконтактний манометр, 21 — зразковий манометр, 22 — сепаратор, 23 — дренажний клапан, 24 — стикувальний вузол, 25 — турбінний датчик витрати ТДР-9

патрубки 12 безпосередньо в нижню частину кожної із робочих камер 15. Це дозволяє зберегти незмінною висоту стовпа рідини в робочих камерах. Тиск у контурі контролюється зразковим манометром або вакууметром 21 у залежності від програми експерименту. Охолоджуюча вода, яка подається в конденсатор, проходить через систему з чотирьох горизонтально розташованих у внутрішній порожнині конденсатора труб 19, об'єднаних одна з одною послідовно. Витрата води вимірювалася ваговим методом, а також контролювалася за допомогою турбінного датчика витрати 25 ТДР-9 за показниками частотомірювача ЧЗ-33.

Експериментальний вузол ЕВ (рис. 3), у якому вивчався процес кипіння (ЗДТ), виконаний у вигляді труби зі сталі 20 (чистота обробки V7, $R_z = 4$) зовнішнім діаметром 127 мм із товщиною стінки 7 мм і довжиною 1000 мм. На зовнішній поверхні експериментального вузла 5 зроблено спіральну канавку радіусом 2.4 ± 0.1 мм із кроком

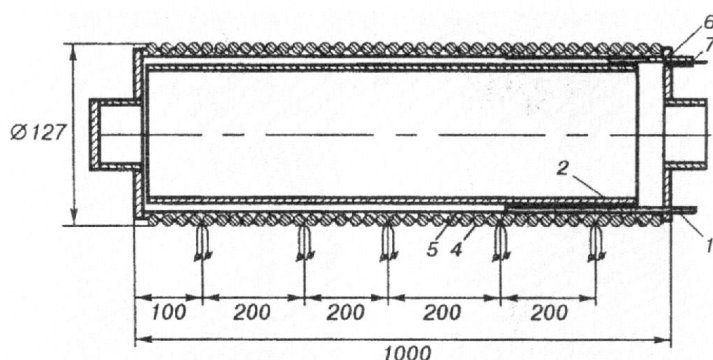


Рис. 3. Схема експериментального вузла зони нагрівання ЗДТ: 1 — кожух термопарного зонда, 2 — циліндричний дефлектор, 3 — термопари, 4 — нагрівальний елемент, 5 — корпус експериментального вузла, 6 — гермороз'єднувач, 7 — термопарний кабель

5 ± 0.1 мм, на поверхню якої нанесене електроізоляційне керамічне покриття товщиною 0.4 мм. У спіральну канавку поміщений нагрівальний елемент 4 із сталевих дроту діаметром 4 мм. Зовні нагрівальний елемент також покритий прошарком електроізоляційної кераміки та азбестової теплоізоляції, що практично виключало втрати тепла в навколишнє середовище. У верхнє торцеве денце ЕВ вварено кожух зонда 1 із нержавіючої трубки діаметром 2 мм, товщиною стінки 0.15 мм, довжиною 400 мм. У кожух зонда поміщено термопарний кабель КТМС із хромель-копелевою термопарою з діаметром електродів 0.15 мм. Крім того, через гермороз'єднувач 6, установлений на цьому ж денці, у внутрішню порожнину ЕВ введені три термопари 7. Корольки термопар 7 приварені до внутрішньої поверхні ЕВ конденсаторним зварюванням на відстані 100, 300 і 500 мм від верхнього денця. Між витками нагрівального елемента в стінці ЕВ в п'яти перерізах по висоті із кроком 200 мм, починаючи з відстані 100 мм від нижнього денця, зроблено по два отвори діаметром 1.2 мм. У порожнину кожного отвору закладена хромель-копелева термопара з діаметром електродів 0.2 мм. Закладання здійснювалося в латунному капілярі. Отвори після укладки в них капіляра з термопарою запаювалися припоем і зачищалися. Для дослідження різноманітних засобів інтенсифікації тепловіддачі в зоні нагрівання ЗДТ у режимі розвинутого кипіння у внутрішню порожнину ЕВ поміщався циліндричний дефлектор 2, утворюючий із внутрішньою поверхнею ЕВ щільний зазор кільцевого перетину, по обидва боки сполучений із внутрішньою порожниною ЕВ. Дефлектор виконано з листової сталі 12Х18Н10Т товщиною 0.8 мм і довжиною 960, 800 і 700 мм. Діаметр дефлектора вибирався

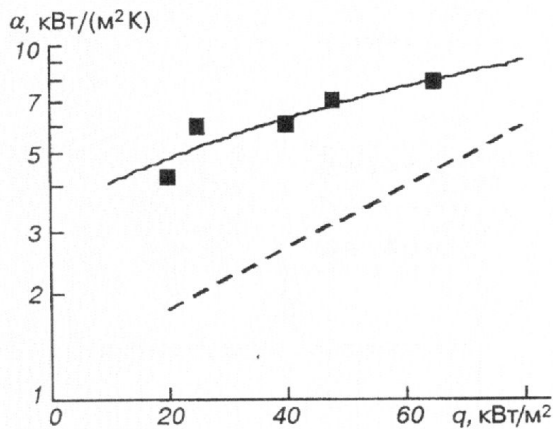


Рис. 4. Значення коефіцієнтів тепловіддачі: квадратики — при кипінні води у щільному каналі, штрихова крива — розрахунки кипіння у великому об'ємі

таким чином, щоб ширина кільцевого зазора змінювалася від 2 до 8 мм.

Експериментальні дані, отримані при кипінні рідини в кільцевому каналі, подані на рис. 4, свідчать про істотну відмінність отриманих коефіцієнтів тепловіддачі α від розрахованих за залежностями для кипіння рідини в умовах вільної конвекції у великому об'ємі, запропонованими у [2]. Видно помітні розходження як абсолютних значень коефіцієнтів тепловіддачі при рівних щільностях теплового потоку q , так і характеру взаємозв'язку

величин α і q аналізованих процесів. Зі збільшенням щільності теплового потоку вплив щільності, що інтенсифікує тепловіддачу, зменшується, а починаючи з деяких значень q , спостерігається навіть погіршення тепловіддачі в порівнянні з вільним об'ємом рідини.

На базі досліджень розроблені і виготовлені автономні енергокомплекси на основі двофазних термосифонів з рознесеними у просторі зонами нагрівання й охолодження.

1. Пиоро И. Л., Антоненко В. А., Пиоро Л. С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами.—Киев; Наук. думка, 1991.
2. Стюшин Н. Г., Элинзон Л. М. Исследование интенсивности теплоотдачи кипящим жидкостям при атмосферном и пониженных давлениях в условиях естественной конвекции // ИФЖ.—1969.—16, N 1.—54 с.
3. Чернобыльский И. И., Тананайко Ю. М. Теплообмен при кипении жидкости в кольцевом канале // ЖТФ.—1956.—26, вып. 10.—С. 2316—2322.

INVESTIGATION OF HEAT EXCHANGE FOR MOBILE STEAM GENERATORS WITH A PURPOSE OF UTILIZATION OF POWER PLANTS

L. V. Pron', L. V. Kabakova

An experimental apparatus is designed for study of heat exchange with a purpose of utilization of power plants. The experimental data are received using a boiling water in the narrow space conditions.

УДК 621.454.2.04:621.646.2/.4

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ АГРЕГАТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

© С. А. Шевченко

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Приведено аналіз конструктивних особливостей і застосування гідравлічних і газових регуляторів, в яких замість електромеханічного приводу для програмного переналаштування використовується електромагніт постійного струму. Розглядаються схеми та конструкції агрегатів регулювання з електромагнітним керуванням.

В настоящее время для программной перенастройки регуляторов ЖРД применяются электромеханические приводы (ЭП). Они используются в системах регулирования кажущейся скорости, системах регулирования уровня топлива и во внутренних систе-

мах стабилизации параметров самих двигателей. Величина усилия, передаваемого чувствительному элементу, пропорциональна углу поворота вала ЭП (рис. 1, а). ЭП являются сложными устройствами, и их масса в большинстве случаев превышает массу