

УДК 621.11+667.64

Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е.

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЕМАЯ ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ КЕРАМИКИ**

Высокотемпературное материаловедение определяет, что телам кристаллической структуры, т.е. металлам, оксидам и тугоплавким соединениям на основе боридов, карбидов, нитридов, силицидов металлов присущи законы изменения физико-механических показателей от температуры близкие к линейным, как, например, для авиационных лопаточных сплавов или конструкционной керамики (рис. 1).

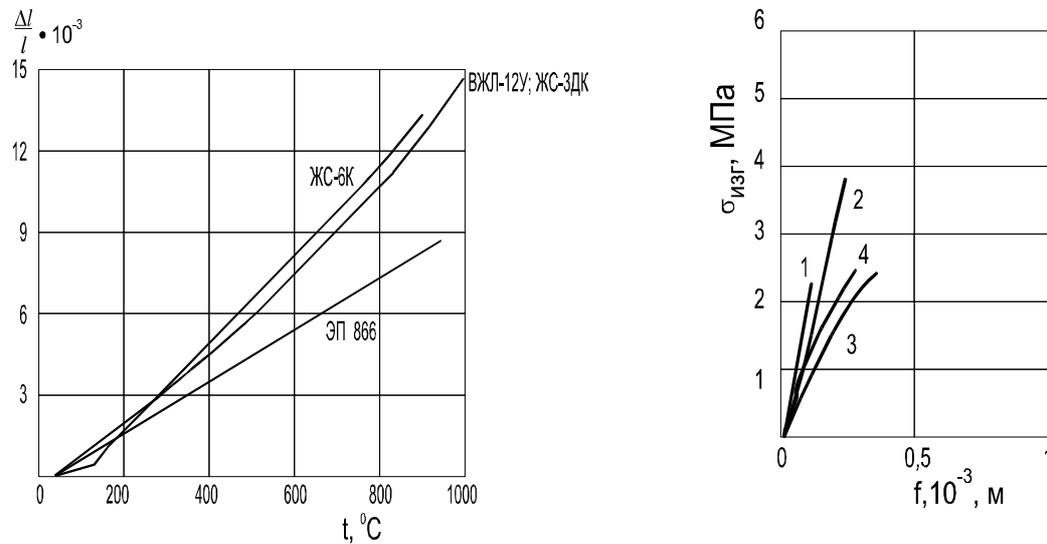


Рисунок 1 – Зависимости от температуры: относительного удлинения сплавов для лопаток турбин авиационных двигателей и предела прочности при изгибе фрагментов покрытий на основе оксидов: Mg –1, Al –2, муллита – 3 и кордиерита – 4 при 800 °С

Однако, керамике присущ наиболее существенный для данного класса материалов недостаток – неудовлетворительная термическая стойкость, определяемая, в первую очередь, сравнительно малой сдвиговой механической прочностью и достаточно высоким термическим коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Поэтому повышение термостойкости керамики можно достичь двумя путями – созданием материалов с ТКЛР близким к нулю и сообщение ей макроструктуры, способной своей податливостью релаксировать напряжения, создаваемые приложенной извне термической нагрузкой.

Податливость структуры твердых тел может предопределяться или трещиноватостью структуры, которая искусственно создается для некоторого повышения термостойкости огнеупорных материалов, либо наличием вязкоупругости, что свойственно полимерным материалам [1], характеризующимися максимальными температурами применения, не превышающими 600 °С.

Исследования по синтезу керамических материалов, обладающих априорно заданными свойствами, позволили разработать наполненные неорганические полимеры, способные образовывать вязкоэластичные структуры (рис. 2). Как оказалось, такие неорганические полимеры могут существовать и при температурах, соответствующих 1000 °С и выше, а присущая им вязкоупругость определяет аномально высокую термостойкость изделий, получаемых на их основе [2].

На основе открытого нового класса керамических материалов созданы высокотемпературные электроизоляционные эрозионностойкие покрытия и подложки датчиков определения термо- и вибронпряженного состояния компрессорных, рабочих и сопловых лопаток турбин, топливных трубопроводов, заклапанных полостей камер сгорания и сопел современных авиационных ГТД. Разработанные материалы позволили повысить температуры измерений температур и уровней напряжений с 600 до 1200 °С на жаропрочных сплавах для элементов турбин и до 1500 °С на керамических датчиках температуры газового потока, керамических турбинных лопатках и измерителях максимальных температур на основе облученных алмазов. Работы были внедрены практически на всех предприятиях Минавиапрома бывшего СССР [3].

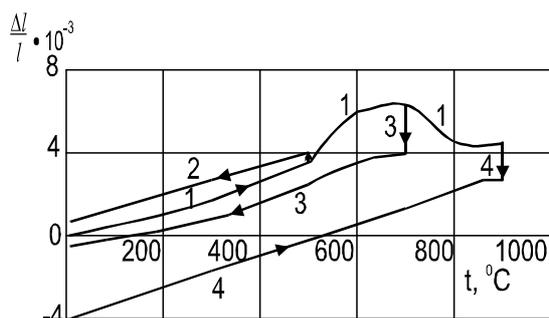


Рисунок 2 – Зависимости изменения относительных размеров образцов из корунда с неорганическим связующим при нагреве (кривая 1), изотермической выдержке в течении 2 часов и охлаждении от температур, °С: 500 – кривая 2, 700 – кривая 3, 900 – кривая 4

Разработанные высокотемпературные электроизоляционные материалы с высокими адгезионными свойствами нашли применение в приемниках лучистых потоков, установленных на внешней поверхности искусственного спутника Земли «Искра-2».

Отсутствие термостойких электроизолирующих покрытий также сдерживало развитие конструкций двигателей ориентации космических кораблей на орбите. Разработка керамической изоляции в толсто пленочном исполнении, обладающей стойкостью к агрессивному воздействию плазмы, вместо массивных керамических материалов, разделяющих основные рабочие элементы двигателей, является одним из путей снижения их массы и габаритов. Для этого были созданы коррозионностойкие электроизоляционные покрытия с температурой эксплуатации до 1500 °С рабочих частей двигателей ориентации космических кораблей с целью уменьшения их массы и объема. Материалы покрытий и технология нанесения внедрены в серийное производство двигателей.

На основе этого класса керамики создана технология и материалы для нанесения теплозащитных эрозионностойких покрытий на внутренние поверхности деталей сложных форм, в частности, элементы выпускного тракта ДВС. Такие теплозащитные покрытия позволяют уменьшить расход топлива транспортных средств, повысить КПД двигателей, снизить их материалоемкость, уменьшить объем системы охлаждения двигателей [4]. Проблему создания материалов и технологии теплозащитных покрытий внутренних поверхностей выпускных ДВС газа решают известнейшие научно-исследовательские центры развитых стран: ИПМ НАН Украины, НПО «Технология» (г. Обнинск, Россия), МТИ, Даймлер-Бенц, Фольксваген, ККК (Германия) по заказу фирмы Порше, Пикардо (Англия), Дженерал электрик, Форд, Вестнигауз, Пратт энд Уитни, Камминс Энджин (США) и др. [5–12].

Тематика работ специализированных лабораторий этих компаний связана, в основном, с созданием керамических элементов – фрагментов теплозащитных покрытий на основе тита-

ната алюминия ( $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ , тиалита), на поверхность которых отливаются металлы. Технология синтеза тиалита отличается высокой степенью сложности и является весьма дорогостоящей, поскольку его кристаллы обладают высокой анизотропией теплового расширения, являющейся причиной образования структурных трещин в изделиях, которые стремятся получить с нулевым значением ТКЛР. Однако технология отливки металлов на фрагменты покрытий, даже нагретые до температур  $600+800$  °С, не реализована, и фирма Порше использует на экспериментальных двигателях гоночных машин только керамические вставки простейших форм. Таким образом, задачу создания внутренней теплоизоляции элементов выпускного тракта ДВС следует считать до настоящего времени не решенной.

Разработанная нами технология отличается тем, что процесс формирования и нанесения покрытий происходит непосредственно при отливке деталей и формирования теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов выпускных каналов ДВС аналогов не имеет [13,14].

Требования, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов газового тракта ДВС, являются трудно достижимыми в одном материале. Покрытия должны одновременно обладать: низкой теплопроводностью, высокой эрозионной стойкостью, термостойкостью, высокой степенью чистоты рабочей поверхности, то есть являться многофункциональными. Сообщение многофункциональных свойств покрытиям можно осуществить на основе принципа создания заданных параметров нескольких свойств, которые присущи каждому из различных материалов, составляющих одно композиционное покрытие. Свойства, которые присущи каждому из материалов, последовательно изменяются по сечению покрытия в соответствии с изменением самих материалов, составляющих покрытие. Т.е. нами предложен принцип совмещения различных свойств в одном покрытии, который определяется его многослойным строением.

Созданная технология позволила разработать теплоизолирующие покрытия выпускных каналов головок цилиндров двигателей СМД-60 и ДТ-2, прошедшие стендовые и 100 часовые ресурсные испытания в условиях, отвечающих эксплуатационным. Был достигнут градиент температуры в  $600$  °С под покрытием толщиной в  $2$  мм на металле при температуре стенки, подверженной воздействию газа в  $1200$  °С.

Новые материалы, которые дает возможность разработать технологические основы вязкоупругой керамики, позволяют создать, в свою очередь, новые технологии. Например, получили развитие работы по созданию керамических нагревателей направленной передачи тепла (рис. 3).

Нами проанализированы конструкции известных типов электрических нагревателей и определено, что для совершенствования параметров их работоспособности и энергоэффективного применения в устройствах необходимо: снизить температуры на резистивных элементах и на теплоотдающей поверхности; максимально развить поверхности теплообмена; задать соответствие геометрических форм теплоотдающих поверхностей нагревателей конфигурации внешних поверхностей нагреваемых объектов; максимально направить потоки передачи тепла в заданном направлении. Перечисленные требования определили отказ от традиционных форм нагревательных элементов и разработку принципиально новых их конструкций. Материалом, на основе которого созданы нагреватели с новыми параметрами работоспособности, является керамика с аномально высокой термостойкостью. Исходя из необходимости обеспечения условий наиболее полной и равномерной передачи тепла керамическими нагревателями, следует, что их необходимо изготавливать в виде тонкопрофильных конструкций, теплопередающая поверхность которых повторяет контур поверхности нагреваемых объектов

[15]. При этом в теле нагревателя на расстоянии в 2 мм от теплоотдающей поверхности монослойно располагаются резистивные элементы, «отслеживающие» поверхность теплоотдачи.



Рисунок 3 – Общий вид керамических нагревателей

Рисунок 4 – Действующая модель устройства термоинтенсификации добычи нефти, представляющая собой блок керамических нагревателей контактного типа, приклеенных к поверхности отрезка НКТ. На фотографии нагреватели скрыты за слоем материала, представляющего собой гидро-, тепло-, электро- и нефтеизоляцию нагревателей и НКТ.

Внешний блестящий слой – теплоотражающее покрытие.

Провода вверху – выводы термодатчиков, внизу – шнур подключения к электросети

Применение разработанных керамических нагревателей контактного типа позволило реализовать передачу тепла нагреваемым объектам за счет теплопроводности, т.е. с минимальными тепловыми сопротивлениями в теплопередающей системе, а также передавать тепло направленным и равномерно распределенным тепловым потоком с максимально развитой теплопередающей поверхностью заданной сложной конфигурации. Это позволило впервые создать электрический пластинчатый теплообменник с практически 100 % передачей тепла нагреваемым средам, который рекомендован для применения для перекачки высоковязкой нефти в шлейфах и применен на предприятиях лакокрасочной промышленности, а также для обогрева промышленных помещений.

Применение керамических нагревателей нового типа и организация приемов направленной передачи тепла, например в химических реакторах, сушильном оборудовании, бытовых приборах и др. позволяет достичь 20–40 % экономии электроэнергии. Разработаны и инфракрасные нагреватели, генерирующие направленно 80–90 % теплового потока, позволяющие оценить энергоэффективность их использования выше 50 %.

Еще одной принципиально новой технологией основанной на использовании керамики нового типа является технология термоинтенсификации добычи высоковязкой и парафинизированной нефти (рис. 4).

При течении такой нефти по скважинам от забоя до устья при ее добыче происходит уменьшение ее температуры, что увеличивает вязкость и уменьшает текучесть нефти, особенно если она обладает неньютоновскими свойствами. При эксплуатации месторождений с высоким содержанием парафинов в нефти в скважине, когда температура в ней становится ниже температуры кристаллизации парафинов, на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ), по которым течет нефть, формируются асфальтосмолопарафиновые отложения, рост которых приводит к уменьшению внутреннего сечения НКТ и, как следствие, к резкому снижению дебита скважин или их закупорке.

Для того чтобы устранить или, хотя бы, уменьшить влияние описанных явлений, затрудняющих добычу нефти, используют различные технологические приемы, позволяющие повысить температуру нефти: паротепловую обработку НКТ; закачку горячей воды в пласт; термохимическое воздействие на пласт нефти в забое; нагрев нефти глубинными электронагревателями, спускаемыми внутрь НКТ или размещаемыми рядом с ними; введение ингибиторов, сдерживающих отложения парафинов; закачку разбавителей в пласты и так далее. Эти методы позволяют снизить вязкость нефти и увеличить ее теплосодержание, что сдерживает процессы зарастания труб и положительно влияет на процесс добычи нефти. Но, как правило, все известные методы или очень дорогостоящие или экологически небезопасны. Кроме того им присущ непродолжительный эффект воздействия на процесс интенсификации добычи. Использование же известных методов глубинного электронагрева нефти позволяет передать ей незначительную часть выделяемого тепла.

Практически полная передача нефти тепла в скважинах при ее добыче реализуется при непосредственном и распределенном контактном нагреве внешней теплоизолированной поверхности НКТ, расположенной в скважине. При этом необходимо создать максимально развитую поверхность теплообмена с тем, чтобы даже ламинарно текущая нефть получила заданное теплосодержание при минимальной, расчетом задаваемой температуре нагреваемой нефти данного состава. Такая температура необходима для обеспечения условий течения нефти без загустевания и кристаллизации вследствие естественного понижения ее температуры при перемещении до следующего участка в скважине, на котором обеспечивается очередной нагрев поверхности НКТ [16].

Ограничение нагрева нефти минимально необходимыми температурами определяется условием необходимостью недопущения протекания процесса графитизации составляющих нефти на внутренних поверхностях НКТ.

Описанные условия рационального и энергоэффективного процесса передачи тепла нефти созданием направленного теплового потока реализуются в предлагаемой комплексной технологии резистивного нагрева участков поверхности НКТ, основанной на:

- использовании керамических нагревателей контактного типа;
- разработке приемов оснащения ими НКТ, а также методов тепло-, электро-, гидро-, нефтеизоляции участков нагрева;
- созданной математической модели процесса конвективного теплообмена нефти на участках НКТ с электрическим обогревом, позволяющей определять количество участков нагрева НКТ вдоль длины скважины, рациональное размещение на них нагревателей и мощность, генерируемую блоками нагревателей;
- способах подвода электропитания нагревателей и термодатчиков и съема термометрической информации;
- создании устройств обработки термометрической информации и автоматического управления процессом нагрева участков НКТ.

Литература

1. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1983. –535 с.
2. Ведь В.Е. Описание деформационных характеристик упруго-вязких покрытий // Вестник Харьковского политехнического института: Сб. научн. тр. – Вып. 26.– Харьков: ХГПУ. – 1999. – С. 122–124.
3. Ведь В.Е., Гусев Ю.А., Епифанов С.В. Исследование технологии и изготовления и методов обработки сигналов высокотемпературных пленочных тензорезисторов // Электротензометрия: Материалы научн.-практич. семинара.– Л.: ЛДНТП.– 1981.– С. 29–34.
4. Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е. Новые материалы и технология теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов выпускного тракта ДВС // Інтегровані технології та енергозбереження.– 2007.–№3.– С. 139–143.
5. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №11. – P. 479–484, 489.
6. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №12. – P. 525–529.
7. Bunting A. Ceramic rotor success for gas turbines // Engineer. – 1977. – Vol.244. – №6303. – 13p.
8. McLean A.F., Davis D.A. The ceramic gas turbine – a candidate powerplant for the middle – and long-term future // SAE Preprint. – 1976. – №760239. – 18 p.
9. Gudel I.E., Schuster P. Keramische Massen auf der Basis von Aluminiumtitanat // Tonindustrie – Zeitung. – 1974. – Vol. 98. – №12. – P. 315–318.
10. Hayes C.W., Zabierek D. Turbine vane ceramic enduvall // Journal Aircraft. – 1975. – Vol. 12. – №4. – P. 247–252.
11. Liebert C.H., Stepka F.S. Ceramic thermal-barrier coating for cooled turbines // AIAA Pap. – 1976. – №729. – P. 1–9.
12. Jordan F.D., Napier J.C., Metcalfe A.G., Duffy T.E. Application of ceramics to a radial inflow gas turbine // SAE Prepr. – 1977. – № 770342. – 13 p.
13. Ведь В.Е. Технология нанесения теплозащитных покрытий внутренних поверхностей деталей газового тракта ДВС // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Вып.5.– Харьков: ХАИ. – 1998. –С. 441–445.
14. Ведь В.Е. Оценка эффективности тепловой изоляции головок цилиндров ДВС // Інтегровані технології та енергозбереження. – 1999.–№2.– С. 81–85.
15. Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е., Гусева Н.И., Верба А.Г. Керамические нагреватели для энергоэффективной направленной передачи тепла. // «Оборудование. Инструмент». – 2006. –№ 3. – С. 96–98.
16. Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е., Ульев Л.М. Энергоэффективное решение проблем добычи и транспорта высоковязкой нефти организацией направленных тепловых потоков. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2007.– №2.– С. 13–18.

Bibliography (transliterated)

1. Ferri Dzh. Vyazkouprugie svoystva polimerov. M.: Izd-vo inostr. lit-ryi, 1983. –535 p.
2. Ved V.E. Opisanie deformatsionnyih harakteristik uprugo-vyazkih pokrytivy Vestnik Harkovskogo politehnicheskogo instituta: Sb. nauchn. tr. – Vyip. 26.–Harkov: HGPU. – 1999. – p. 122–124.

3. Ved V.E., Gusev Yu.A., Epifanov S.V. Issledovanie tehnologii i izgotovleniya i metodov obrabotki signalov vyisokotemperaturnykh plenochnykh tenzorezistorov Elektrotenzometriya: Materialy nauchn.-praktich. seminarov. – L.: LDNTP. – 1981. – p. 29–34.
4. Tovazhnyanskiy L.L., Ved V.E. Novyye materialy i tehnologiya teplozaschitnykh pokrytiy vnutrennih poverhnostey elementov vyipusknogo trakta DVS Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2007. – #3. – p. 139–143.
5. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen MTZ – 1976. – Vol. 37. – #11. – P. 479–484, 489.
6. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen MTZ – 1976. – Vol. 37. – #12. – P. 525–529.
7. Bunting A. Ceramic rotor success for gas turbines Engineer. – 1977. – Vol.244. – #6303. – 13p.
8. McLean A.F., Davis D.A. The ceramic gas turbine – a candidate powerplant for the middle – and long-term future SAE Preprint. – 1976. – #760239. – 18 r.
9. Gudel I.E., Schuster P. Keramische Massen auf der Basis von Aluminiumtitanat Tonindustrie – Zeitung. – 1974. – Vol. 98. – #12. – R. 315–318.
10. Hayes C.W., Zabierek D. Turbine vane ceramic enduvall Journal Aircraft. – 1975. – Vol. 12. – #4. – R. 247–252.
11. Liebert C.H., Stepka F.S. Ceramic thermal-barrier coating for cooled turbines AIAA Pap. – 1976. – #729. – R. 1–9.
12. Jordan F.D., Napier J.C., Metcalfe A.G., Duffy T.E. Application of ceramics to a radial inflow gas turbine SAE Prepr. – 1977. – # 770342. – 13 r.
13. Ved V.E. Tehnologiya naneseniya teplozaschitnykh pokrytiy vnutrennih poverhnostey detaley gazovogo trakta DVS Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya: Sb. nauchn. tr. – Vyip.5. – Harkov: HAI. – 1998. – p. 441–445.
14. Ved V.E. Otsenka effektivnosti teplovoy izolyatsii golovok tsilindrov DVS Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 1999. – #2. – p. 81–85.
15. Tovazhnyanskiy L.L., Ved V.E., Guseva N.I., Verba A.G. Keramicheskie nagrevateli dlya energoeffektivnoy napravlennoy peredachi tepla. «Oborudovanie. Instrument». – 2006. – # 3. – p. 96–98.
16. Tovazhnyanskiy L.L., Ved V.E., Ulev L.M. Energoeffektivnoe reshenie problem dobychi i transporta vyisokovyazkoy nefi organizatsiyey napravlennykh teplovykh potokov. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2007. – #2. – p. 13–18.

УДК 621.11+667.64

Товажнянський Л.Л., Ведь В.С

### **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЙ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧЕНО ЗАСТОСУВАННЯМ НОВОЇ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ КЕРАМІКИ**

Розглянуто властивості нового класу матеріалів, якому притаманна аномально висока термостійкість. На основі запропонованої технології створено високотемпературні покриття датчиків визначення термо- і вібронапруженого стану елементів сучасних авіаційних ГТД, рушіїв космічних кораблів, керамічні нагрівники та ін.

УДК 621:664(076)

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А.,  
Мельниковская Л.А., Терещенко В.Н.

**ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ  
ОРТОФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ**

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

**Введение**

В работе [1] нами описана технологическая схема производства фосфорной кислоты экстракционным методом (рис. 1). При анализе технологической схемы были определены технологические потоки, которые могут быть включены в теплоэнергетическую интеграцию процесса. Были также определены все теплофизические характеристики технологических потоков. В работе сделан анализ энергосбережения и показано, что в настоящее время для проведения процесса от внешних горячих утилит потребляется мощность, равная 9,05 МВт, а отводится от процесса мощность, равная 12 МВт.  $\Delta T_{min}$ , определенное для вертикального теплообмена в существующей технологической схеме, равно 72 °С с расположением этой точки по горячей кривой на 144 °С, а по холодной – на 72 °С.

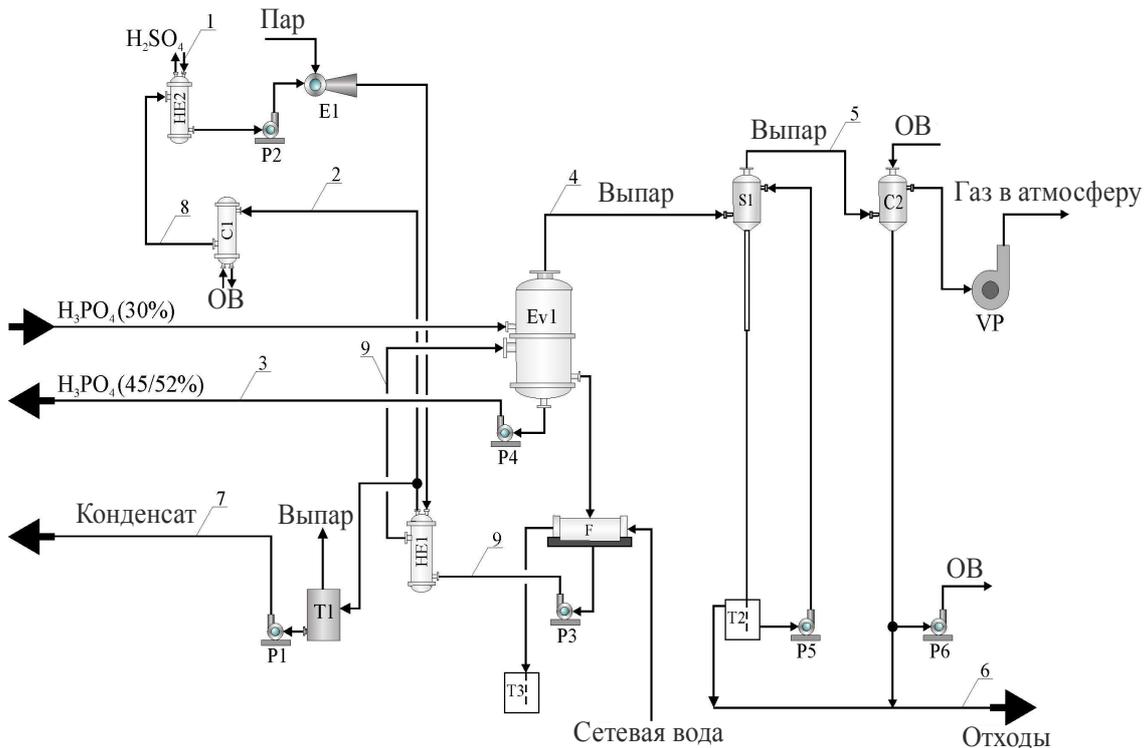


Рисунок 1 – Технологическая схема концентрации ортофосфорной кислоты  
P1–P6 – насосы; T1–T3 – емкости; HE1, HE2 – теплообменные аппараты; C1, C2 – конденсаторы; Ev – выпарка; E – эжектор; VP – вакуумный насос; S – скруббер.  
Номера потоков показаны в соответствии с таблицей 1

Утилитное расположение хорошо иллюстрируется на большой составной кривой (рис. 2). При этом наблюдается крайне малая мощность рекуперации тепловой энергии ~ 0,91 МВт. Используя эти данные, синтезируем принципиальную технологическую схему для разработки проекта реконструкции теплоэнергетической системы существующего процесса производства фосфорной кислоты экстракционным методом.

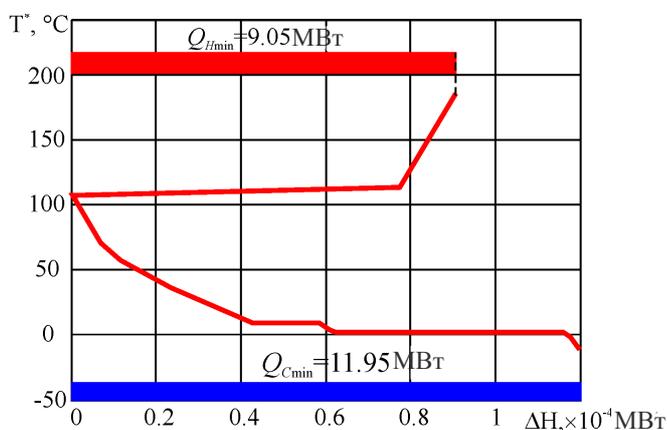


Рисунок 2 – Большая составная кривая существующего процесса

**1. Синтез сеточной диаграммы проекта реконструкции теплоэнергетической системы**

Для разработки сеточной диаграммы процесса с минимальной приведенной стоимостью или указанным сроком окупаемости необходимо определить некоторые технологические и экономические параметры процесса.

Используя найденные ранее теплофизические параметры потоков, мы определяем из опубликованных в литературе данных коэффициенты теплоотдачи для каждого технологического потока в теплообменном оборудовании, что позволяет записать потоковую таблицу в виде (таблица 1).

Таблица 1 – Расширенная потоковая таблица данных

№	Поток	Тип	TS, °C	TT, °C	G, т/ч	C, кДж/(кг·C)	r, кДж/кг	CP, кВт/°C	ΔH, кВт	α□□ Вт/(м²·°C)
1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	hot	94	45	44,00	1,49		18,21	892,34	1000
2	Конденсат 1	hot	150	35	15,95	4,19		18,56	2134,6	1500
3	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (45/52%)	hot	73	25	14,45	2,30		9,23	443,13	800
4	Выпор 1	hot	72	45	11,15	1,96		6,07	163,91	100
	Конд. выпора 1	hot	45	45	2,35		2394		1562,8	2000
5	Выпор 2	hot	45	38	8,80	1,94		4,73	33,11	100
	Конд. выпора 2	hot	38	38	8,00		2411		5357,8	2000
6	Отходы	hot	40	25	10,35	4,19		12,05	180,69	800
7	Конденсат 3	hot	150	35	9,32	4,19		10,85	1248	1500
8	Конденсате 2	cold	35	150	15,95	4,19		18,56	2134,6	1500
9	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (циркуляция)	cold	72	78	2040,00	2,30		1303,33	7820,0	1000

Поскольку в существующей системе рекуперации тепловой энергии используется один теплообменный аппарат, мы можем считать синтез рекуперативной системы теплообмена созданием корневого проекта теплообменной сети, т.е. не учитывать стоимость существующих теплообменников. Это позволяет определить оптимальное значение минимальной разности температур между теплоносителями в теплообменных аппаратах, т.е.  $\Delta T_{\min}$ , при которой приведенная стоимость проекта будет минимальной, а значит прибыль от реализации разрабатываемого проекта будет максимальной.

Анализ стоимостных кривых, соответствующих системе технологических потоков процесса показывает, что существует достаточно широкий пологий участок вблизи минимального значения приведенной стоимости  $\Pi$  проекта теплообменной системы (рис. 3). Вычисления проводились при кредитной ставке 10 %. Детализация стоимостных данных вблизи  $\Delta T_{\min\text{ОПТ}}$  показывает, что мы можем считать стоимость проекта постоянной в интервале изменения  $\Delta T_{\min}$  от 5 °С до 20 °С. Поскольку в действующей в настоящее время системе теплообмена экстракционного процесса производства фосфорной кислоты существуют три теплообменных аппарата (один рекуперативный и два утилитных) (рис. 1), мы выберем для построения технологической схемы проекта реконструкции крайнее левое значение этого интервала, т.е.  $\Delta T_{\min}=5$  °С.

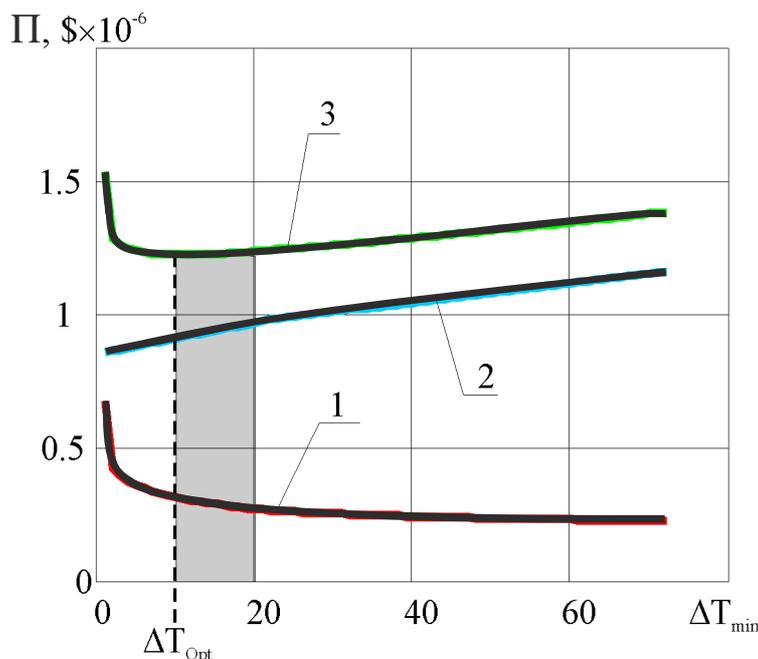


Рисунок 3 – Стоимостные кривые для системы технологических потоков из таблицы 2.

- 1 – общая приведенная стоимость; 2 – годовая стоимость энергии;
- 3 – приведенная стоимость оборудования

Использование каскадного метода для этого значения  $\Delta T_{\min}$  показывает, что пинч находится на температурах  $T_{\text{hot}}=77$  °С и  $T_{\text{cold}}=72$  °С.

Мощность, потребляемая процессом от горячих утилит в проекте реконструкции может быть уменьшена с 9,05 МВт до 6,8 МВт, холодные утилиты при этом уменьшаются с 11,95 МВт до 8,87 МВт, а мощность рекуперации возрастает с 0,91 МВт до 3,14 МВт, т.е. более, чем в 3 раза.

Построение большой составной кривой иллюстрирует возможное распределение утилит в процессе. Если параметры потребляемой утилиты, т.е. пара в данном случае,

не изменять, то большая составная кривая для проекта реконструкции с расположением утилит будет выглядеть так, как показано на рисунке 4.

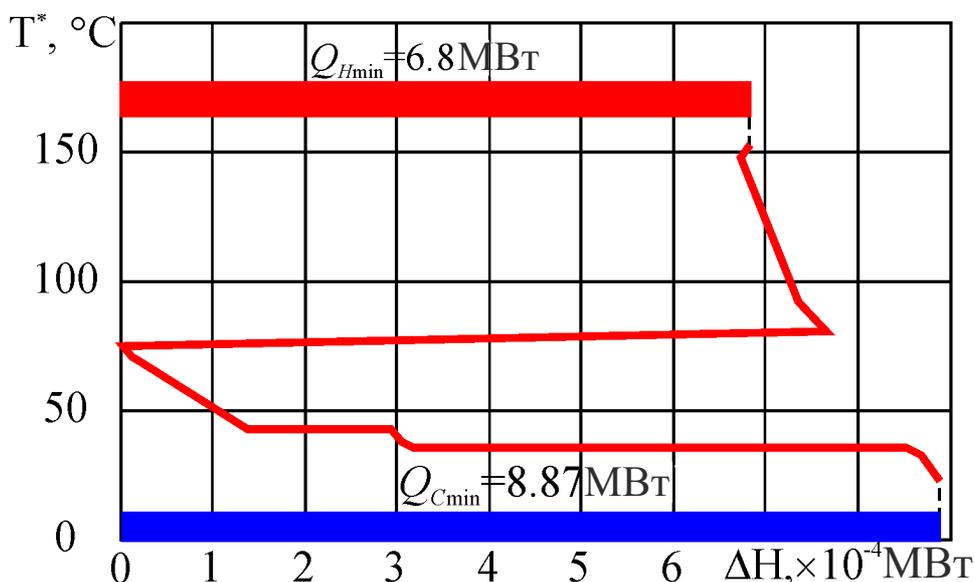


Рисунок 4 – Большая составная кривая, построенная для  $\Delta T_{\min} 5^{\circ}\text{C}$

Поскольку  $\Delta T_{\min}$  в системе теплообмена выбрано равное  $5^{\circ}\text{C}$ , будем использовать для реконструкции пластинчатые теплообменные аппараты фирмы Alfa Laval, которые позволяют достичь это значение  $\Delta T_{\min}$ . Анализ цен на теплообменное оборудование и потребляемую тепловую энергию в странах Европейского Содружества позволил определить цены, необходимые для покупки и инсталляции теплообменных аппаратов:

- цена  $1\text{m}^2$  теплообменной поверхности, изготовленной из стали типа AISI 316 равна 400 долл. США;
- из сплава хастеллой равна 1000 долл. США;
- стоимость установки теплообменного аппарата с его обвязкой равна 15000 долл. США;
- стоимость горячих утилит составляет величину 103 долл. США за 1 кВт год;
- стоимость холодных утилит – 20 долл. США за 1 кВт год.

Аппарат составных кривых дает возможность не только определить оптимальные значения мощности потребляемых утилит, т.е. целевые энергетические значения установки, но и необходимую для обеспечения такого потребления энергии величину площади поверхности рекуперативного и утилитного теплообмена, а также количество утилитных и рекуперативных теплообменных аппаратов. В проекте реконструкции, обеспечивающем потребление энергии и показанном на рисунке 5, необходимо шесть рекуперативных теплообменных аппаратов с общей площадью поверхности  $\sim 1847 \text{ m}^2$ , два теплообменных аппарата на горячих утилитах с общей площадью поверхности теплообмена  $\sim 19 \text{ m}^2$ , и пять теплообменных аппаратов на холодных утилитах с общей площадью поверхности теплообмена равной  $\sim 900 \text{ m}^2$ . Следовательно, для технологической схемы проекта реконструкции может понадобиться тринадцать теплообменных аппаратов с общей площадью поверхности теплообмена, равной  $\sim 2765 \text{ m}^2$ .

Итак, еще до начала проектирования самой технологической схемы проекта реконструкции системы теплообмена, мы уже знаем энергетические цели и технологиче-

ские параметры, которым она должна удовлетворять и к которым необходимо стремиться.

Срок окупаемости, год

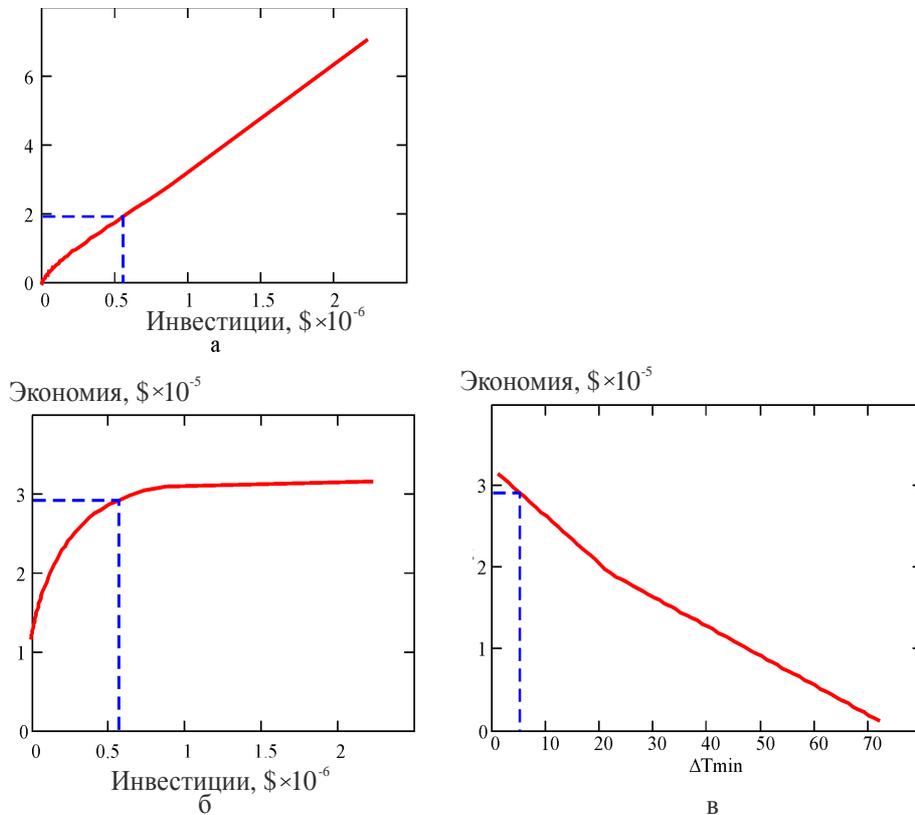


Рисунок 5 – Диаграмма соответствия между возможными целевыми функциями использующихся для создания оптимизированных проектов реконструкции процесса концентрирования в производстве фосфорной кислоты экстракционным методом  
 а – зависимость срока окупаемости от капитальных вложений; б – зависимость величины прибыли от капитальных вложений; в – зависимость величины прибыли от  $\Delta T_{\min}$

Аппарат составных кривых также позволяет сделать оценку величины необходимых инвестиций, значения ожидаемой прибыли и значения срока окупаемости с учетом стоимости уже имеющихся в процессе теплообменных аппаратов.

При создании проекта реконструкции теплообменной системы процесса производства фосфорной кислоты (рис. 1) с  $\Delta T_{\min}=5$  °C необходимо инвестировать в проект ~ 560000 долл. США (рис. 5). Годовая прибыль после реализации проекта составит величину в 292000 долл. США, а срок окупаемости с учетом процентной ставки в 10 % – величину ~ 1,9 года.

Итак, мы определили все целевые значения, к которым необходимо стремиться при синтезе технологической схемы проекта реконструкции процесса (рис. 1) для потоковых данных (табл. 1). Локализация пинча для  $\Delta T_{\min}=5$  °C на популяции технологических потоков, расположенных в своих интервалах температур показывает, что пинч пересекают четыре потока (рис. 6): три горячих и один холодный. На этих потоках правило  $\Delta T_{\min}$  [1] должно строго выполняться.

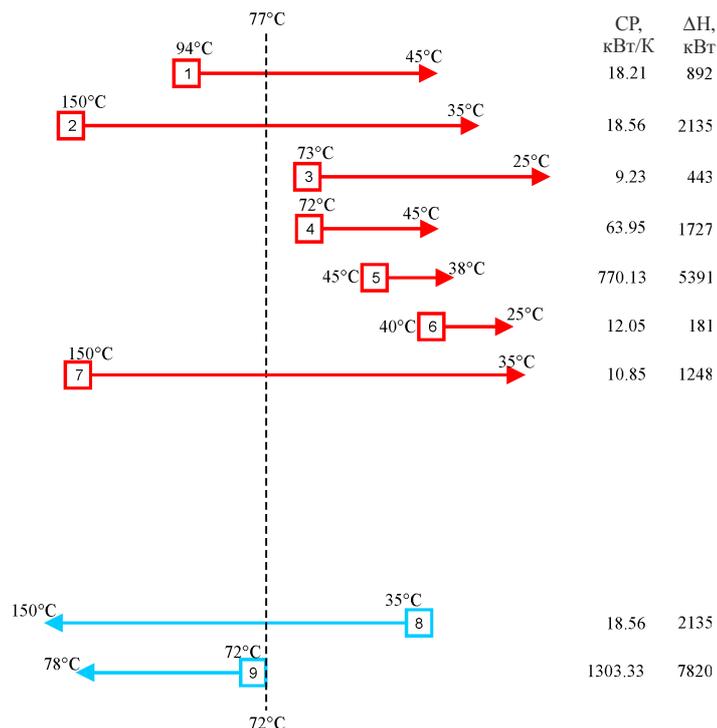


Рисунок 6 – Локализация пинча на популяции технологических потоков для технологического процесса, изображенного на рис. 1

Для того чтобы достичь целевых энергетических значений в проекте реконструкции нам необходимо запретить перенос тепловой энергии через область пинча. Это означает, что все нагрузки на холодные потоки выше пинча должны быть удовлетворены за счет теплообмена с горячими потоками и горячими утилитами. Аналогично, ниже пинча, все нагрузки на горячие потоки должны быть удовлетворены при рекуперативном теплообмене с холодными потоками и холодными утилитами. Для этого мы разделим популяцию технологических потоков (рис. 6) на две подсистемы потоков. Подсистему потоков, находящуюся ниже пинча и подсистему потоков, расположенную выше пинча.

Далее синтезируем сеточные диаграммы выше пинча и ниже пинча независимо друг от друга, и после их сшивки на температурах пинча получаем сеточную диаграмму теплообменной системы процесса концентрации в производстве фосфорной кислоты экстракционным методом (рис. 7). В данной сеточной диаграмме перенос тепловой энергии через пинч запрещен.

Потребление тепловой мощности процессом концентрирования с теплообменной системой, соответствующей сеточной диаграмме на рис. 7 составляет величину 6812 кВт, а мощность холодных утилит – величину 8874 кВт, что полностью соответствует значениям на рисунке 5. Полученная система теплообмена содержит пять рекуперативных теплообменников, семь утилитных теплообменников и один скруббер на горячем потоке №4 (рис. 7).

Нетрудно заметить, что размещения рекуперативных теплообменников НЕ3 и НЕ5 на потоках №1 и №2 образуют так называемую тепловую петлю [2], после устранения которой получаем сеточную диаграмму с четыре рекуперативными и семь утилитными теплообменными аппаратами (рис. 8).

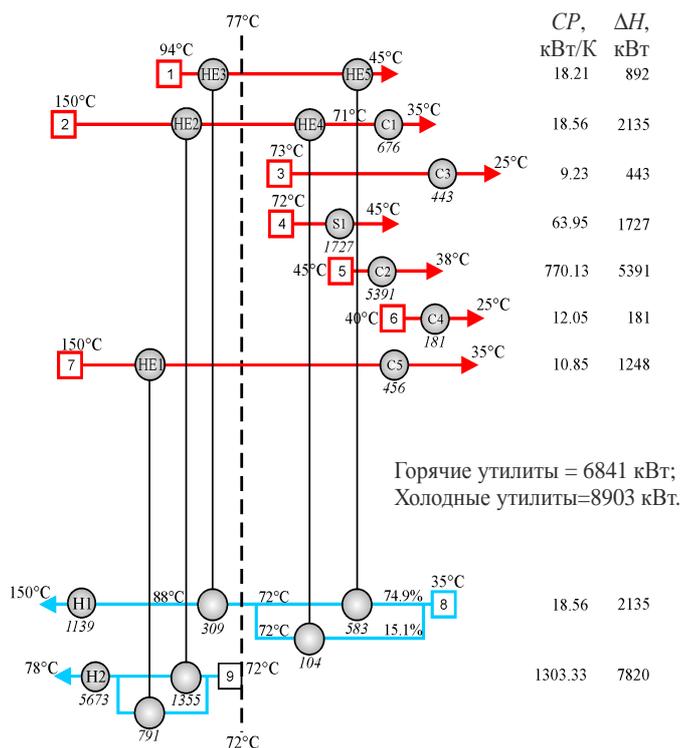


Рисунок 7 – Сеточная диаграмма для полной системы технологических потоков процесса концентрирования фосфорной кислоты, получаемой по экстракционному методу, выполненная путем сшивки сеточных диаграмм для подсистем выше и ниже пинча на пинч-температурах

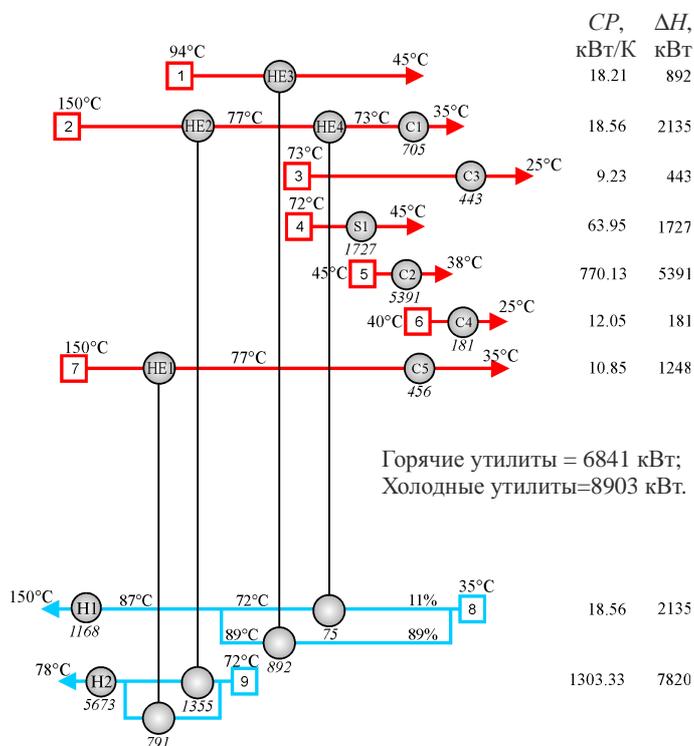


Рисунок 8 – Оптимизированная сеточная диаграмма проекта реконструкции процесса концентрирования фосфорной кислоты, получаемой по экстракционному методу

При реализации системы теплообмена, построенной на основании полученной сеточной диаграммы (рис. 9), мощность, потребляемая от горячих утилит, составит 6841 кВт, а холодных утилит – 8903 кВт. Мощность рекуперации составляет величину 3120 кВт.

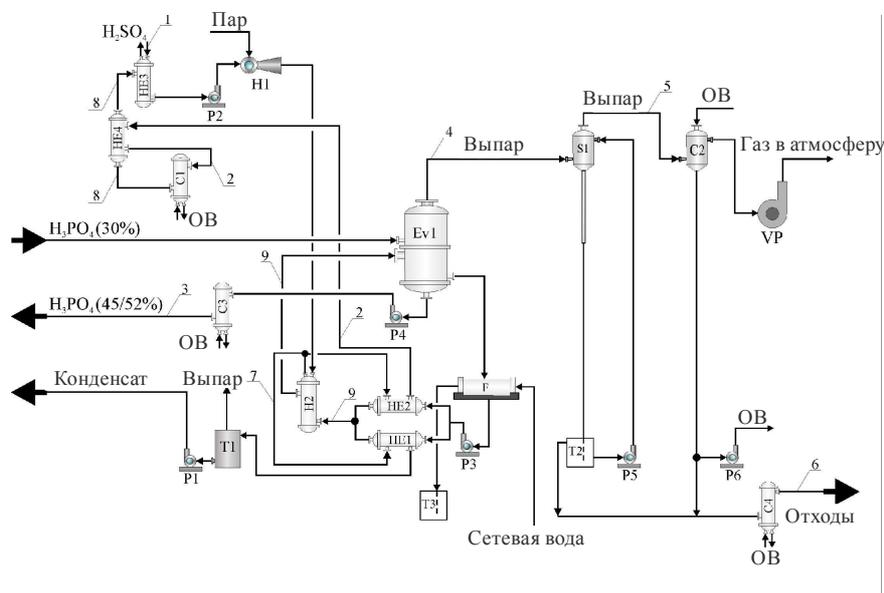


Рисунок 9 – Технологическая схема проекта реконструкции процесса концентрации ортофосфорной кислоты P1–P6 – насосы; T1–T3 – емкости; HE1, HE2, HE3, HE4 – теплообменные аппараты; C1, C3, C4 – холодильники, C2 – конденсаторы; Ev – выпарка; E – эжектор; VP – вакуумный насос; S скруббер, F – фильтр. Номера потоков показаны в соответствии с таблицей 1

В результате интеграции процесса концентрирования в экстракционном методе получения фосфорной кислоты можно снизить удельное энергопотребление на 25 % от существующего уровня по горячим утилитам и на 26 % – по холодным утилитам.

Характеристики новых теплообменных аппаратов приведены в таблице 2. Поскольку  $\Delta T_{\min}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$  на кожухотрубчатых теплообменниках трудно достижимое, то мы предлагаем использовать в новой системе рекуперации тепловой энергии пластинчатые теплообменные аппараты фирмы Alfa Laval.

Таблица 2 – Технологические характеристики теплообменных аппаратов для проекта реконструкции

Имя	Горячая сторона		Холодная сторона		K, Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	Q, Вт	S, м <sup>2</sup>	Цена, \$ USA
	T <sub>in</sub> , °C	T <sub>out</sub> , °C	T <sub>in</sub> , °C	T <sub>out</sub> , °C				
C3	73	26	25	55	2228	489.5	42.0	76555
C4	40	26	25	35	4905	168.3	14.9	4794
C5	77	35	25	55	6172	454	5.0	2563
HE1×2	150	77	72	74	1022	400.4	32.2	50418
HE2×2	150	77	72	72	1103	685.3	49.6	72342
HE4	77	73	35	72	6987	75.0	2.7	2056

Эффект от реализации разработанного проекта реконструкции представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Энергопотребление и рекуперация существующей системы теплообмена и системы теплообмена в предлагаемом проекте

Объект	Сейчас, кВт	Проект, кВт	Уменьшение, кВт	Прибыль, долл. США в год
Горячие утилиты	9047	6841	2206	230411
Холодные утилиты	11947	8903	3044	61480
<b>ИТОГО</b>				<b>891890</b>

Используя таблицу 2, вычисляем общие капитальные затраты, которые составят значение ~ 557564 долл. США. Следовательно, простой срок окупаемости будет равен ~ 1,91 года.

## **2. Заключение**

В работе проведен пинч-интеграция процесса концентрирования ортофосфорной кислоты при ее производстве экстракционным методом. Синтезирована сеточная диаграмма предлагаемого проекта реконструкции системы теплообмена данного процесса. На основе диаграммы построена принципиальная энерготехнологическая схема проекта реконструкции, внедрение которой позволит снизить необходимое потребление горячих утилит на 2206 кВт, а холодных – на 3044 кВт. Срок окупаемости предлагаемого проекта реконструкции составит величину около 23 месяцев.

## **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта ЕСОРНОS, контракт No INCO-СТ-2005-013359.

## **Литература**

1. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Определение энергосберегающего потенциала в экстракционном процессе производства фосфорной кислоты // Интегровані технології та енергозбереження. 2007, № 3. С. 14–12.
2. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов: Харьков: НТУ “ХПИ”. 2000.– 457 с.

## **Bibliography (transliterated)**

1. Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M., Boldyirev S.A. Opredelenie energosberegayushego potentsiala v ekstraktsionnom protsesse proizvodstva fosfornoj kislotyi Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. 2007, # 3. p. 14–12.
2. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov: Harkov: NTU “HPI”. 2000.– 457 p.

УДК 621:664(076)

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Ульєв Л.М., Болдирев С.О.,  
Мельниковська Л.О., Терещенко В.М.

**ПІНЧ-ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНЦЕНТРУВАННЯ  
ОРТОФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ**

У роботі проведений пінч-інтеграція процесу концентрування ортофосфорної кислоти при її виробництві екстракційним методом. Синтезовано сіткову діаграму пропонуваного проекту реконструкції системи теплообміну даного процесу. На основі діаграми побудована принципова енерготехнологічна схема проекту реконструкції, впровадження якої дозволить знизити необхідне споживання гарячих утиліт на 2206 кВт, а холодних – на 3044 кВт. Строк окупності пропонуваного проекту реконструкції складе величину близько 23 місяців.

УДК.623.438.32.

Борисюк М.Д., Климов В.Ф., Анипко О.Б., Магерамов Л.К.-А.,  
Колбасов А.Н., Кудреватых Д.Н.

### **ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ДЛЯ ВОЕННЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН**

Одной из основных проблем, стоящих перед создателями современных танков, является разработка системы воздухопитания, обеспечивающей высокую степень очистки воздуха при минимальных энергетических затратах. Учитывая разнообразие задач, решаемых танком и условия его эксплуатации в различных почвенно-климатических зонах, в том числе возможность движения в условиях радиоактивного заражения местности, необходимо решить сложный комплекс научно-технических проблем по обеспечению надежной очистки воздуха для всего диапазона режимов работы двигателя.

Сложность задачи заключается в ограничении массо-габаритных показателей, что связано с ограничением массы танка и размещением системы очистки воздуха в защищенных объемах. Как правило, приходится решать и задачу достаточной защиты системы воздухопитания от засорения растительным покровом местности, хвойными иглами, листьями и другими элементами слабо закрепленного растительного покрова.

Особую значимость имеют проблемы, связанные с зимней эксплуатацией при низких температурах и снежном покрове, в том числе при сублимации в проточной части газодинамического тракта.

В ранний период развития танков и другой гусеничной техники наиболее распространенным являлся многоступенчатый воздухоочиститель, в котором очистка воздуха осуществлялась в циклонном аппарате и далее на абсолютных фильтрах. Степень очистки воздуха в циклонных аппаратах, как правило, была не очень высока, поэтому большое количество пыли приходилось осаждать на кассетах. Исходя из этого, необходимо было устанавливать несколько кассет, работающих последовательно. Отсутствие какой-либо диагностической аппаратуры для контроля состояния кассет могло приводить, в случае предельного накопления пыли кассетами, к резкому увеличению пропуска пыли кассетами и выходу из строя двигателя из-за износа цилиндро-поршневой группы. Другим существенным недостатком являлась необходимость частой замены либо обслуживания кассет при эксплуатации изделий в условиях повышенной запыленности воздуха, особенно с увеличением средних скоростей движения, что является одним из главных факторов, влияющих на величину запыленности воздуха.

Авария на Чернобыльской АЭС поставила новые задачи перед создателями гусеничной военной техники. Как правило, тягачи, используемые в народном хозяйстве, являются продуктом общего направления развития силовых установок военных гусеничных машин и в первую очередь танков. Повышенный уровень радиации не позволяет проводить обслуживание кассет в этих условиях, а эксплуатация такой техники без кассет вообще невозможна, что является еще одним существенным недостатком ранее разработанных систем воздухопитания.

Более поздние этапы развития танкостроения за рубежом характеризовались неизменностью многоступенчатого способа очистки воздуха с постоянным совершенствованием каждой из ступеней. В США, Германии, Франции, Англии основное направление заключалось в разработке фильтрующих элементов, как правило устанавливаемых отдельно от циклонного аппарата (танки «Шерман», «Центурион» и позднее «Лео-

пард», «Леклерк». Создание фильтрующих элементов, работающих с малой удельной воздушной нагрузкой, позволяло увеличить время движения танка до очередного обслуживания или замены кассет.

Появление принципиально новых высокопористых ячеистых материалов и разработка оригинальных способов их очистки в процессе эксплуатации танка, позволило повысить эффективность систем воздухопитания, однако это далеко не решает проблемы создания эффективной системы воздухопитания.

Отличительной особенностью воздухоочистителя танка Т-72 является циклонный аппарат низкой эффективности. На режиме максимального крутящего момента двигателя коэффициент пропуски, составляет всего 0,7 %. Значительный объем занимают кассеты – две из которых, пропитанные топливом – накопительные и одна, обращенная к входному патрубку двигателя – предохранительная. Низкая эффективность циклонного аппарата и большой объем кассет как недостатки, компенсируются такими существенными преимуществами как низкое аэродинамическое сопротивление – на уровне  $700 \text{ кгс/м}^2$  и возможностью работы до предельного сопротивления  $1300^{+50} \text{ кгс/м}^2$ .

Такой вариант исполнения воздухоочистителя имеет существенные недостатки, главные из которых – резкое увеличение пропуски пыли при достижении предельно допустимого сопротивления при частотах двигателя ниже максимальных. Причем, в этом случае резко уменьшается величина аэродинамического сопротивления и система сигнализации предельного сопротивления не отслеживающая частоту двигателя, не может фиксировать подобные явления. Другим недостатком данной системы является невозможность работы воздухоочистителя со снятыми кассетами, при эксплуатации танка в районах с повышенной радиацией.

На танке 478 устанавливался бескассетный воздухоочиститель с высокоэффективными циклонами, обеспечивающими очистку воздуха с коэффициентом пропуски, не менее 0,2 % на режиме 80 % от  $N_e \text{ max}$ .

При кажущейся простоте такого воздухоочистителя, разработанного для двухтактного двигателя с турбонаддувом, сложность его заключается в том, что необходимо конструктивно обеспечить высокую степень защиты самого воздухоочистителя и циклонный аппарат от засорения посторонними предметами, во все периоды эксплуатации танка, что само по себе является непростой задачей. Высокое аэродинамическое сопротивление либо частичное перекрытие входных патрубков одного или нескольких циклонов приводит к повышенному пропуску пыли, что является причиной абразивного износа цилиндрико-поршневой группы двигателя. Исходя из этого, оба варианта воздухоочистителей требуют серьезной доработки. Одно из главных направлений в совершенствовании систем воздухоочистки современных танков является комплексное решение задачи, удовлетворяя всем требованиям, предъявляемым к танку. Такое решение может быть найдено только при создании высокоэффективного циклона при низком аэродинамическом сопротивлении, что само по себе является противоречивым явлением, с надежной защитой двигателя при любых аномальных явлениях, связанных с ухудшением степени очистки воздуха воздухоочистителем.

С учетом реальных характеристик существующих систем воздухоочистки современных танков, Харьковским конструкторским бюро по машиностроению имени А.А. Морозова проведены исследования новых разработок применительно к украинским танкам Т-80УД и «Оплот».

Основные технические характеристики танков Т-72, «Оплот» и Т-80У приведены в таблице.

Таблица – Сравнительные характеристики систем очистки воздуха танков Т-72, Т-80УД, «Оплот»

Тип танка (странапроизвод.)	Тип двигателя	Мощность двигателя, л.с.	Производ. компр. наддув кг/с	Хар-ка воздухоочистите- ля	Аэродинам. сопротивл., кгс/м <sup>2</sup>		Степень очистки воздуха кэф. пропуска, %	Межпромысловый срок при эксплуат. в пустыне, км
					начальное	конечное		
Т-72 (Россия)	4-х тактный дизель	840	1,02	2-х ступенч. цикл.аппарат 3-х слойн.кассет	700	1300 <sup>+50</sup>	0,2	400
«Оплот» (Украина)	2-х тактный дизель	1200	1,85	3-х ступенч. инерц.решетки цикл.аппарат 2-х слойная кассета	1000	1500 <sup>+100</sup>	0,15...0,2	1000
Т-80У (Россия)	газотур- бинный	1250	4,5	одноступенчатый на базе прямо- точн.циклонов	700		0,4...0,6	без об- служив.

На графиках рис. 1 и 2 для танка Т-80УД показаны характеристики изменения аэродинамического сопротивления и коэффициента пропуска пыли при длительных стендовых испытаниях, имитирующих движение танка в пустыне при постоянной запыленности воздуха на входе в воздухоочиститель, равной 2 г/кг.

С увеличением времени работы коэффициент пропуска пыли уменьшается и возрастает аэродинамическое сопротивление.

Критическое значение сопротивления, равное 1300<sup>+50</sup> кгс/м<sup>2</sup> достигается за 35 часов работы. По результатам испытаний танков Т-80УД в пустыне Кара-Кум определены межпромысловые сроки кассет, которые являются функцией запыленности воздуха при движении по разбитым такырам. При средней запыленности воздуха 2,5 г/кг танк может двигаться ~1000 км (20 час работы двигателя) до очередного обслуживания кассет. С уменьшением запыленности воздуха межпромысловый срок уменьшается и может быть 3000 км.

Существовавшее представление о нецелесообразности высокой степени очистки воздуха для газотурбинных двигателей полностью не оправдало себя и появились дополнительно проблемы, связанные с налипанием на рабочие лопатки турбины мелкодисперсной лессовой пыли. Крупным достижением стала разработка прямоточных циклонов с принудительным завихрением на входе, что при невысоком аэродинамическом сопротивлении позволило обеспечить очистку воздуха с коэффициентом пропуска на уровне 0,4...0,6 % при сравнительно небольших габаритах.

Примером создания нового типа воздухоочистителя явились работы для танка Т-80УД и «Оплот» с двигателями мощностью 1000 и 1200 л.с. Отличительной особенностью выбранной схемы стала разработка циклона высокой эффективности с низким аэродинамическим сопротивлением, с коэффициентом пропуска не хуже 0,2+0,02 %, что находится на уровне очистки чистого бескассетного воздухоочистителя, работающего в комплексе с кассетами сравнительно небольшого объема. Такой воздухоочиститель не имеет аналога в мировом танкостроении, т.к. может работать в любых почвенно-климатических зонах с кассетами и без них.

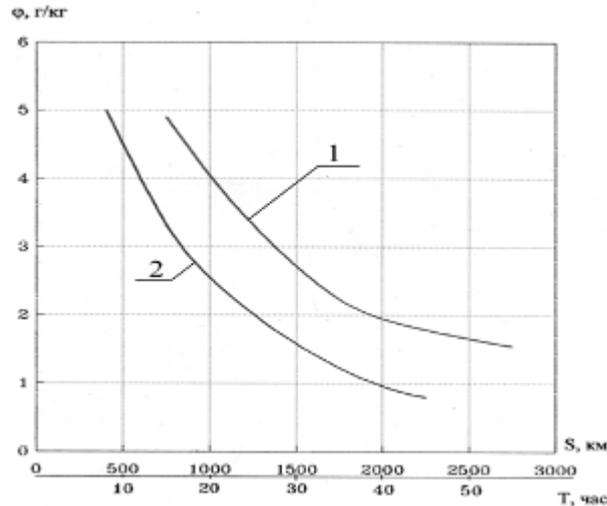


Рисунок 1 – Обобщенные зависимости периодичности обслуживания кассет ВО от средних значений запыленности воздуха по результатам испытаний танков в пустыне Кара-Кум (1 – T, 2 – S)

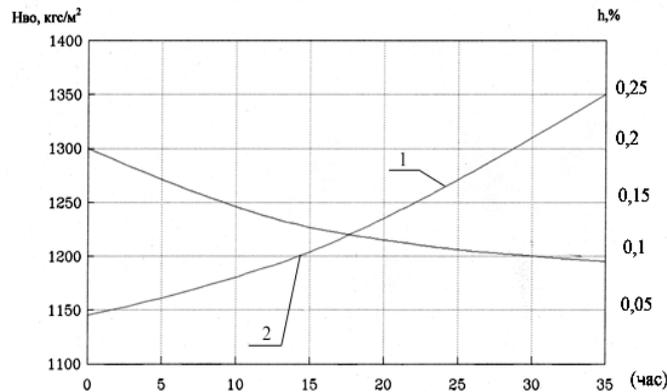


Рисунок 2 – Изменение характеристики кассетного воздухоочистителя при стендовых испытаниях на пыли по ГОСТ В18185-72  
1 – H<sub>во</sub>, 2 – h<sub>проп</sub>

Создание высокоэффективного циклона с низким сопротивлением было выполнено на основе моделирования циклона танка 476 путем его масштабирования с сохранением условий подобия. Разработанные подходы по созданию воздухоочистителя нового поколения легли в основу системы воздухопитания для перспективного изделия, разрабатываемого ХКБМ им. А.А. Морозова.

Анализ наиболее распространенных систем воздухоочистки украинских и зарубежных гусеничных машин специального назначения показывает необходимость постоянной творческой работы по поиску новых технических решений в области систем воздухоочистки, что связано с целым рядом факторов – главные из которых следующие:

- обеспечение надежной и длительной работы двигателя на всех режимах;
- возможность эксплуатации танков в различных почвенно-климатических зонах;
- обеспечение достаточной степени очистки воздуха в особых режимах «брод», подводное движение, движение по зараженной местности;
- длительная работа системы воздухоочистки без обслуживания;
- надежная работа в случае появления аварийных ситуаций и сигнализация их появления;
- минимальные затраты мощности двигателя на систему воздухоочистки;

- надежный комплекс защитных мероприятий, исключающий засорение всего газозащитного тракта;
- сигнализация технического состояния отдельных элементов системы воздухопитания и воздухоочистителя в целом.

### **Выводы**

1. Поставленные задачи повышения эффективности системы очистки воздуха решаются путем создания и разработки отдельных элементов:

- предварительной ступени очистки воздуха с автономным отсосом отсепарированной пыли;
- циклона с высокой степенью очистки воздуха на номинальном режиме, обеспечивающим степень очистки воздуха с коэффициентом пропуска не ниже 0,2+0,02 % при минимальном аэродинамическом сопротивлении;
- эжектора отсоса пыли из пылесборника воздухоочистителя с достаточной эффективностью работы на всех режимах двигателя в т.ч. особых, характерных для гусеничных машин;
- кассеты – с достаточной пылеемкостью и надежной защитой двигателя от абразивного износа при аварийных ситуациях по циклонному аппарату;
- системы сигнализации предельного состояния элементов системы воздухопитания, обеспечивающая надежную работу при любых аварийных ситуациях.

2. Наиболее перспективной является комбинированная система очистки воздуха танка Т-80УД и «Оплот», обеспечивающая пробег в пустыне без обслуживания кассет до 1000 км с достаточной эффективностью очистки воздуха в любых режимах эксплуатации.

3. Дальнейшее совершенствование танковых систем очистки воздуха должно проводиться в направлении разработки более эффективных циклонов и кассет с автоматической сигнализацией предельно допустимых характеристик.

### **Литература**

1. Технические отчеты КП ХКБМ им. А.А. Морозова по результатам испытаний танков в ТУРКВО.
2. Двигатель 6ТД. Техническое описание – М.Военное издательство.– 1982– 140 с.
3. Балдин В.А. Теория и конструирование танков.– М.Военное издательство 1975.– 442 с.
4. Климов В.Ф., Кудров В.М. и др. к вопросу повышения эффективности системы очистки воздуха для объектов бронетанковой техники Механіка та машинобудування. НТУ “ХПІ” 11, 2004 р.

### **Bibliography (transliterated)**

1. Tehnicheskie otchetyi KP HKBM im. A.A. Morozova po rezultatam ispytaniy tankov v TURKVO.
2. Dvigatel 6TD. Tehnicheskoe opisanie – M.Voennoe izdatelstvo.– 1982– 140 p.
3. Baldin V.A. Teoriya i konstruirovaniye tankov.– M.Voennoe izdatelstvo 1975.– 442 p.
4. Klimov V.F., Kudrov V.M. i dr. k voprosu povyisheniya effektivnosti sistemyi ochistki vozduha dlya ob'ektov bronetankovoy tehniki Mehanika ta mashinobuduvannya. NTU “HPI” 11, 2004 r.

УДК.623.438.32.

Борисюк М.Д., Клімов В.Ф., Аніпко О.Б., Магерамов Л.К.-А., Колбасов О.М.,  
Кудреватих Д.М.

**ВИСОКОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА ОЧИСТКИ ПОВІТРЯ  
ДЛЯ ВІЙСЬКОВИХ ГУСЕНИЧНИХ МАШИН**

У статті показано необхідність створення для військових гусеничних машин надійної системи очистки повітря.

Приведені дані систем очистки повітря дизельних двигунів та газотурбінних, та розроблені основні напрямки удосконалення систем очистки повітря.

УДК 664.046.6.002.5

Бурдо О.Г., Безбах И.В., Зыков А.В., Омар Саид Ахмед

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ

**Вступление.** В пищевой промышленности одними из самых энергозатратных являются технологии тепловой обработки, концентрирования жидких продуктов, сушки дисперсных материалов. Энергозатраты на процесс связаны не только со свойствами обрабатываемых продуктов, но и с неэффективной организацией подвода энергии к продукту.

**Термообработка жидких пищевых продуктов.** Поведение большинства жидкостей, подвергаемых термообработке в пищевой промышленности отличается от жидкостей ньютоновской группы. К группе пищевых неньютоновских жидкостей (ННЖ) относятся томатная паста, различные пюре, кефир, сгущенное молоко и др. Анализ свойств ННЖ показывает, что энергозатраты при их термообработке значительно выше в сравнении с группой ньютоновских жидкостей [1]. Основными проблемами, возникающими при тепловой обработке таких продуктов, являются: изменение качества продукта в зависимости от продолжительности теплового воздействия; процесс интенсивного накипеобразования. Высокая вязкость, плотность, низкая удельная теплоемкость и специфическое поведение ННЖ в зависимости от скорости сдвига усложняют решение вышеупомянутых проблем традиционными методами интенсификации.

**Выпаривание ННЖ.** Процесс концентрирования пищевых жидкостей путем выпаривания широко распространен в пищевых технологиях. Это энергоемкий процесс, который определяет качество готового продукта. Так в США ежегодно удаляется 100 млрд. т. воды из сахарных сиропов, фруктовых соков, молока, кофейных экстрактов и пр. На процесс выпаривания расходуется  $2,8 \cdot 10^{14}$  МДж. На рынке Украины находится широкий спектр продуктов полученных с помощью методов концентрирования (выпаривание, криоконцентрирование). При выпаривании в основном образуются жидкости неньютоновской группы. Сам продукт пригорает к теплообменной поверхности, изменяется его качество. Анализ энерготехнологических моделей показывает, что значительные потери энергии присутствуют при транспортировке энергоносителя к аппарату. Поиск новых методов интенсификации тепло- массообмена, создание энергоэффективных аппаратов являются актуальными проблемами для пищевой промышленности Украины. Возникает необходимость усовершенствования процессов выпаривания в направлении снижения энергозатрат, улучшения характеристик существующих аппаратов, разработки новых эффективных конструкций.

**Сушка дисперсных продуктов.** Близки по свойствам к ННЖ и дисперсные продукты. Для решения задачи сохранения и улучшения качества дисперсных пищевых продуктов используют комплекс различных мероприятий. В их число входят сушка, активное вентилирование. Характер развития сушильной техники, анализ литературных источников показывают, что энергетическому анализу зерносушильной техники не уделялось должного внимания. Подбор рационального способа сушки, либо комбинация способов оказывает существенное влияние на энергозатраты и качество готового продукта. Сушка является энергоемким процессом. Физическая энергия, необходимая для превращения 1кг воды в пар составляет порядка 2,5 МДж, однако сушильные технологии потребляют в 2,5...3 раза больше.

**Научно-техническая идея разработок.** Для решения проблем при нагревании, выпаривании, сушки в пищевой промышленности возможно использовать аппараты на базе двухфазных автономных модулей.

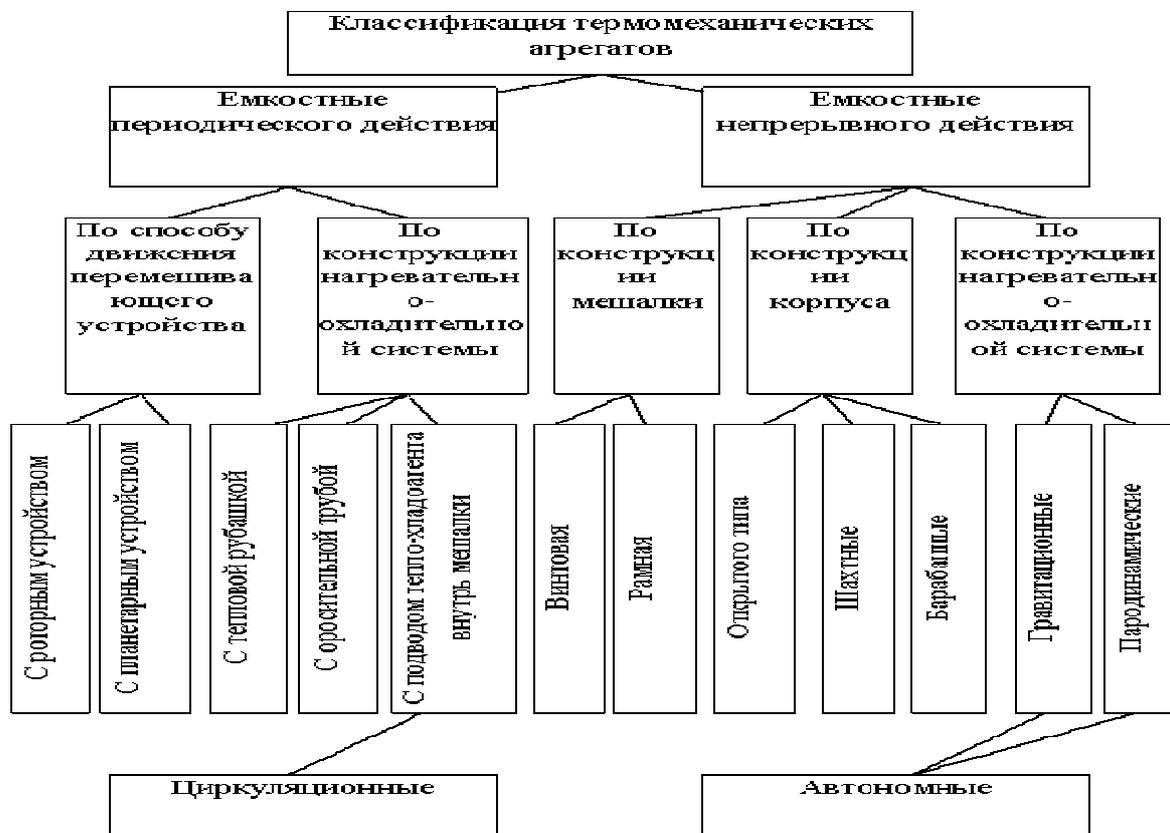


Рис. 1.12. Классификация термомеханических агрегатов.

Рисунок 1 – Классификация термомеханических агрегатов

Применение термосифонов, вращающихся термосифонов (ВТС) дает возможность создавать циркуляцию теплоносителя. За счет этого достигается снижение энергозатрат на процесс. Кроме того, применение автономных аппаратов с ВТС дает возможность сократить цепочку преобразования-транспортировки-потребления энергии, что приводит к снижению энергозатрат. Для интенсификации процесса термообработки необходимо разрушить внутреннюю структуру ННЖ и «заставить» ее вести себя максимально близко к ньютоновской жидкости. Этого можно достичь путем повышения напряжения, а также скорости сдвига, т.е. механической обработкой. Такой процесс удобно реализовать в аппаратах с ВТС. Аналоги конструкций аппаратов с ВТС – термомеханические агрегаты (ТМА) являются циркуляционными системами. В конструкциях ТМА слабым элементом является узел уплотнения при подводе пара и отводе конденсата. Герметизация узла соединения вращающегося ротора с подводным неподвижным паропроводом и конденсаторопроводом – технически сложная задача. ТМА классифицируют как автономные и циркуляционные (рис. 1). К автономным относится аппарат с вращающимся термосифоном (ВТС), созданный на кафедре процессов и аппаратов Одесской национальной академии пищевых технологий.

Аппарат с вращающимся термосифоном относится к аппаратам контактного типа (контактные сушилки и т.д.). Аппарат с ВТС состоит из корпуса, конденсатора, парогенератора, привода. ВТС представляют собой герметично закрытую полость, час-

точно заполненную теплоносителем. При подводе теплоты к испарителю теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в конденсатор, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода охлаждающей среде. Пар перемещается за счет разности давления в испарителе и конденсаторе в результате уменьшения объема при конденсации пара. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель. Таким образом, в ВТС реализуется замкнутый испарительно-конденсационный цикл. Продукт поступает в корпус сверху, сталкивается с нагретой поверхностью конденсатора. Происходит сушка, перемешивание, либо нагревание продукта, после чего продукт выгружается через нижний патрубок в корпусе.

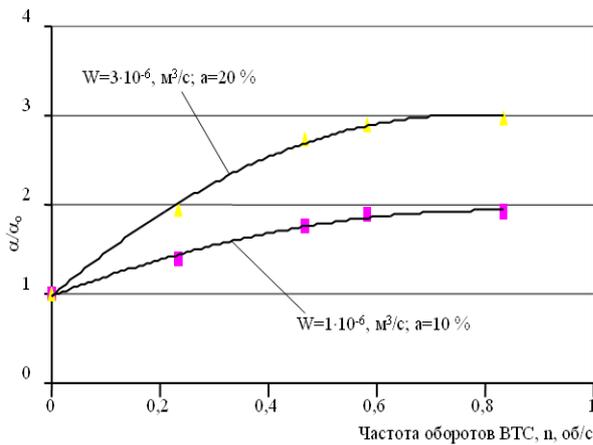


Рисунок 2 – Степень интенсификации для сахарного раствора

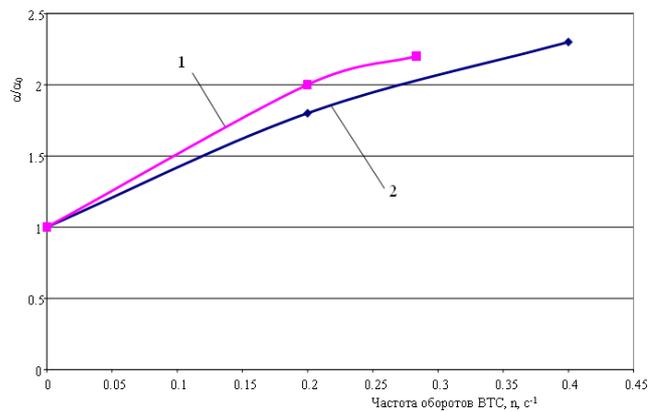


Рисунок 3 – Степень интенсификации для пюре: 1) яблочное (выпаривание); 2) абрикосовое (нагрев)

**Экспериментальное моделирование тепло- массообмена в аппаратах с ВТС.** Интенсификация процесса в аппарате достигается за счет разрушения теплового и диффузионного пограничных слоев. Степень интенсификации возрастает с увеличением вязкости продукта, его концентрации ( $a$ ), расхода ( $W$ ) (рис. 2, 3).

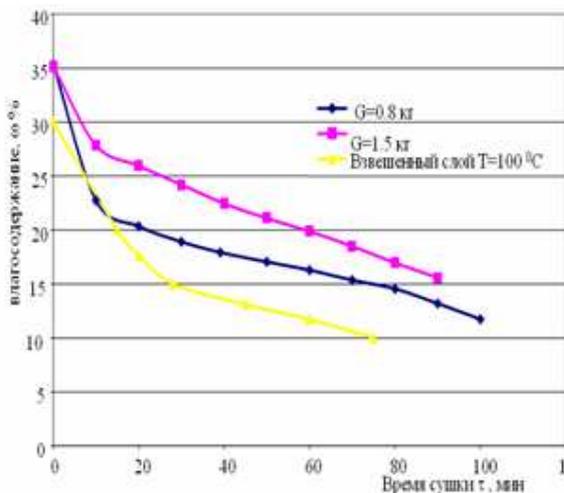


Рисунок 4 – Кривые сушки вареного гороха в аппарате с ВТС

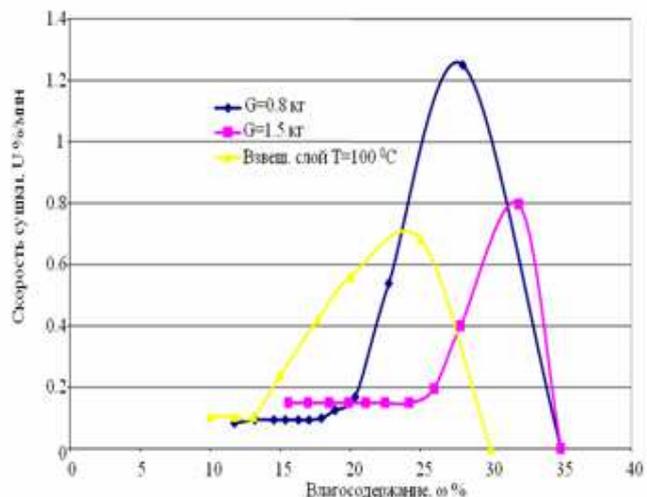


Рисунок 5 – Кривые скорости сушки вареного гороха в аппарате с ВТС

Степень интенсификации определяется по соотношению  $\alpha/\alpha_0$ , где  $\alpha$  –

коэффициент теплоотдачи при вращении термосифона. Предварительные опыты по интенсификации процесса выпаривания яблочного пюре в аппаратах с ВТС показывают  $\alpha/\alpha_0 \approx 2$  (рис. 3).

Проведены исследования кинетики сушки вареного гороха в аппарате с ВТС (рис. 4, 5) при различной степени загрузки аппарата (G). Температура поверхности модуля поддерживалась равной  $95 \pm 120$  °С. Для сравнения выбрана сушка вареного гороха во взвешенном слое при температуре воздуха  $T=100$  °С. Скорость сушки в аппарате с ВТС  $U=0,8 \pm 1,2$  %/мин, по сравнению с сушкой во взвешенном слое  $U=0,7$  %/мин.

**Энергетика аппаратов с ВТС.** Применение схемы с циркуляционным термомеханическим агрегатом позволяет значительно интенсифицировать процесс, применение ТМА с вращающимся термосифоном кроме интенсификации процесса уменьшает цепочку термотрансформации энергии. Проведены исследования аппарата с ВТС в линии производства варено-сушеного гороха.

Определены удельные энергозатраты линии ( $\mathcal{E}_{уд}$ ) (рис 6а) как суммарные затраты электрической (Э) и тепловой (Q) энергии на производство продукта. Наибольший сегмент-сушка –  $\mathcal{E}_{уд}=5,1$  МДж/кг.

Планируется установка аппарата вместо ленточных сушилок, что даст возможность существенно снизить энергозатраты линии (рис. 6б). По сравнению с существующей

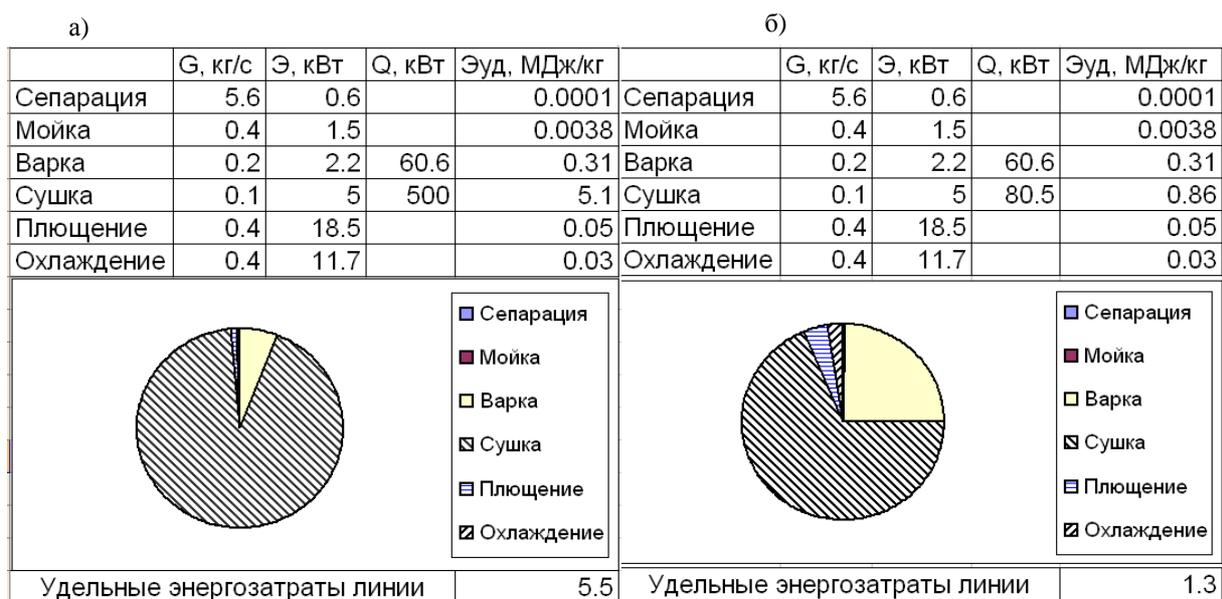


Рисунок 6 – Удельные энергозатраты линии варено-сушеного гороха:  
а) до модернизации; б) после модернизации

вующей линией энергозатраты снижаются в 5 раз.

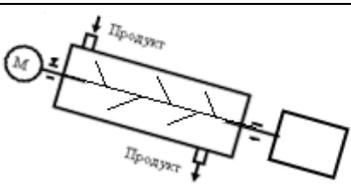
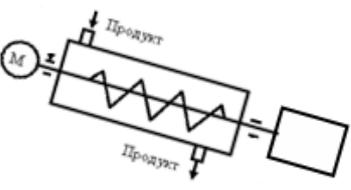
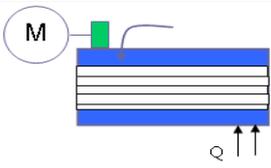
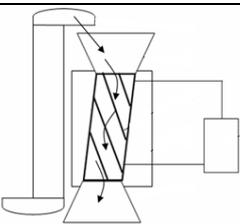
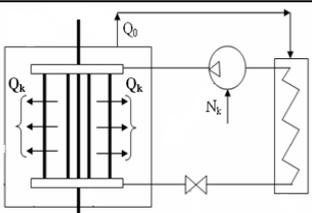
Значительного сокращения энергозатрат возможно достичь применяя аппарат с ВТС в качестве сушилки и одновременно плющителя гороха.

**Перспективы аппаратов с ВТС.** Возможно развитие конструкций на базе ВТС в процессах выпаривания, сушки (табл. 1). В аппарате 1 установлен разветвленный конденсатор ВТС. Устройство теплопередающего модуля позволяет эффективно реализовывать термомеханическую обработку ННЖ, а также дробление и сушку дисперсных продуктов. В аппарате 2 модуль выполнен в виде полого шнека, что позволяет не только интенсифицировать процессы тепло- массообмена, но и осуществлять перемещение

продукта. Аппарат 3 выполнен по аналогии с барабанной сушилкой. Роль барабана выполняет ВТС. Интерес представляют аппараты, в которых перемешивание продукта осуществляется за счет формы статического теплового модуля – конструкции 4, 5. Аппарат 4 – блочная зерносушилка, позволяет не только снизить удельные энергозатраты на сушку, но и получить продукт без канцерогенных примесей.

При сушке в окружающую среду вместе с отработавшим сушильным агентом выбрасывается большое количество низкопотенциальной теплоты. Представляется перспективным утилизацию этой теплоты осуществлять с помощью теплового насоса. В исполнении 5 аппарат работает как сушилка с тепловым насосом.

Таблица 1 – Развитие конструкций автономных ТМА

№	Конструктивное исполнение аппарата с ВТС	Функциональные задачи и достоинства, ожидаемый эффект
1		Перемешивание, дробление, нагрев. Интенсификация процесса нагрева ( $\alpha/\alpha_0=2-20$ ), выпаривания ННЖ ( $\alpha/\alpha_0=2.2$ ), сушка дисперсных продуктов (3.1 МДж/кг). Снижение энергозатрат на 30 %.
2		Транспортировка продукта, перемешивание, нагрев. Интенсификация процесса нагрева, выпаривания ННЖ, сушка дисперсных продуктов, сокращение цепочки термотрансформации энергии.
3		Сушка дисперсных пищевых продуктов. Снижение удельных энергозатрат на сушку.
Аппараты на базе статического модуля		Функциональные задачи и достоинства
4		Сушка дисперсных пищевых продуктов. Снижение удельных энергозатрат на сушку.
5		Сушка дисперсных пищевых продуктов. Снижение удельных энергозатрат на сушку. Расчетный удельный расход теплоты на сушку 0,5 МДж/кг, коэффициент термотрансформации 4,2.

Применение аппаратов с ВТС для нагрева ННЖ исследовано [2], в процессах выпаривания, сушки дисперсных продуктов практически не исследовано [3]. Потенциал таких аппаратов в для повышения энергетической эффективности и интенсификации процессов достаточно высок (табл. 1).

#### Литература

1. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен: Пер. с англ. под ред. А.В. Лыкова М.: Мир, 1964. – 216 с
2. Безбах И.В., Бурдо О.Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОДАХТ. – 1999. Вип. 21. – С. 234–237.
3. Бурдо О.Г., Безбах І.В., Савкін М.В. Інтесифікація термообробки харчових рідин // Наукові праці ОНАХТ. – 2004. Вип. 27. – С. 218–220.

#### Bibliography (transliterated)

1. Uilkinson U.L. Nenyutonovskie zhidkosti. Gidromehanika, peremeshivanie i teploobmen: Per. s angl. pod red. A.V. Lyikova M.: Mir, 1964. – 216 p.
2. Bezbah I.V., Burdo O.G. Termomehanicheskiy agregat dlya dispersnyih produktov Naukovi pratsi ODAHT. – 1999. Vip. 21. – p. 234–237.
3. Burdo O.G., Bezbah I.V., Savkin M.V. Intesifikatsiya termoobrobki harchovih ridin Naukovi pratsi ONAHT. – 2004. Vip. 27. – p. 218–220.

УДК 664.046.6.002.5

Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В., Омар Саїд Ахмед

### **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ**

Стаття присвячена питанням створення термомеханічних агрегатів (ТМА) на основі ротаційних термосифонів (РТС). Проведений аналіз технологій теплової обробки, концентрування рідких харчових продуктів, сушіння дисперсних матеріалів. Виявлені проблеми і визначені шляхи їх вирішення. Приведена класифікація ТМА. Розглянуто застосування апаратів з РТС для різних харчових продуктів. Приведені результати експериментального моделювання тепло- масообміну в апаратах з РТС. Проведено розрахунок і аналіз ефективності застосування апаратів в технологічних лініях. Розглянуті перспективи конструкцій автономних ТМА, їх функціональні задачі і достоїнства, очікуваний ефект.

УДК 662.743

Губинский М.В., Шишко Ю.В., Шевченко Г.Л., Усенко А.Ю.,  
Федоров С.С., Кремнева Е.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ БИОМАССЫ В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Использование отходов биомассы в энергетических целях в последнее время вызывает в нашей стране все больший интерес. Это обусловлено не только повышением цен на ископаемые виды топлив, но еще и тем, что биомасса является  $\text{CO}_2$  – нейтральным топливом, а значит, ее использование позволит снизить эмиссию парниковых газов в атмосферу по сравнению с углем и газом.

Теоретические основы переработки органических отходов сельского хозяйства и промышленности изучены достаточно подробно [1,2] и при переходе к практическому применению основной задачей является разработка малозатратных процессов и технологий, позволяющих получать энергию с низкой себестоимостью, способную конкурировать с энергией из ископаемых видов топлива.

Данные исследования являются этапом создания комплексной технологии переработки органических отходов промышленности и сельского хозяйства для совместного производства тепловой и электрической энергии.

В качестве сырья для предлагаемой технологии могут быть использованы любые мелкодисперсные органические отходы сельского хозяйства и промышленности, например, лузга подсолнечника, скорлупа грецкого ореха, гречневая и просяная шелуха, опилки, за исключением рисовой шелухи, имеющей высокую (до 20 %) зольность, что отрицательно влияет на качество углистого остатка [1].

Технология основана на двухстадийном процессе переработки биомассы. На первой стадии сырье проходит термическую обработку в процессе пиролиза в реакторе шахтного типа, в котором организуется режим фильтрационного горения в плотном слое [3], с образованием углистого остатка. На второй стадии углистый остаток может подвергаться газификации, причем, технически оба процесса могут быть проведены в одном реакторе.

В процессе пиролиза сырья получается пиролизный газ, который используется в энергетическом или технологическом агрегате для замены природного газа, либо для энергетического обеспечения процесса (подогрева воздуха, подогрева топлива, получения пара). Одним из основных условий эффективного использования пиролизного газа является его сжигание в горячем состоянии, что позволяет полностью использовать энергетический потенциал конденсирующихся компонентов.

Углистый остаток, полученный на первой стадии процесса, может быть реализован как самостоятельное сырье для производства, например, топливных древесно-угольных брикетов, а может быть подвергнут паровой активации (прямо в реакторе) и реализовываться уже в виде активированного угля.

Генераторный газ, получаемый в процессе газификации, может использоваться для питания двигателя внутреннего сгорания.

Преимуществами двухстадийного процесса является возможность получения газа с низким содержанием смол без применения в схеме системы очистки.

В работе проведены экспериментальные исследования двухстадийного процесса пиролиза и газификации скорлупы грецкого ореха с насыпной плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$ , и шелухи гречки с насыпной плотностью  $150 \text{ кг/м}^3$  в плотном слое в режиме фильтрационного горения.

Для исследования процесса пиролиза в плотном слое была создана пилотная установка, представленная на рисунке 1.

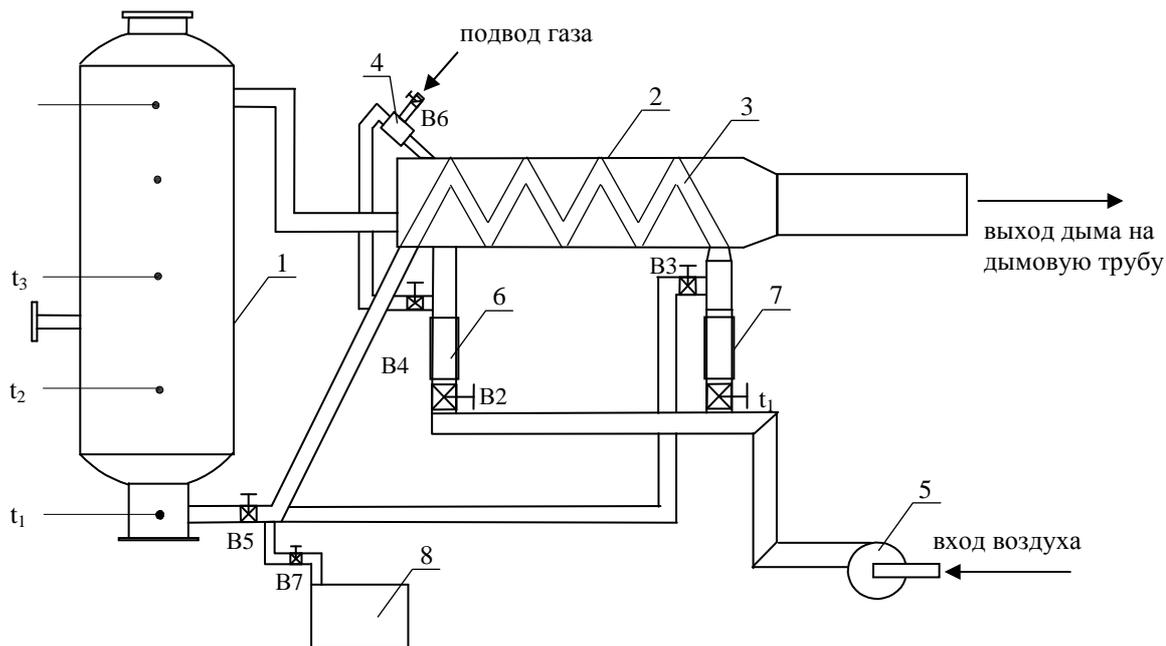


Рисунок 1 – Схема пилотной установки по исследованию процесса пиролиза отходов биомассы в плотном слое:

- 1 – камера-реактор; 2 – горелочный тоннель; 3 – воздухоподогреватель; 4 – дежурная горелка;  
5 – воздуходувка; 6, 7 – счетчики газа; 8 – парогенератор

Загрузка исходного сырья производилась через крышку в верхней части камеры-реактора 1, после чего крышка закрывалась. Габаритные размеры реактора: высота 700 мм, диаметр 300 мм. Масса загружаемой биомассы ~ 20 кг.

Запуск установки начинался с разогрева материала воздухом, нагретым до температуры 100–120 °С.

Нагрев воздуха производился в воздухоподогревателе 3, который размещен в горелочном тоннеле 2. Для разогрева воздуха в начальный момент запуска установки использовалась дежурная горелка 4, работающая на природном газе. Расход природного газа на процесс составлял 1–1,5 м<sup>3</sup>.

После равномерного прогрева слоя отходов до температуры 50 °С производился поджиг слоя. Фронт горения в слое исходного сырья двигался сверху вниз, навстречу потоку воздуха. Образующийся в процессе пиролизный газ отводился в горелочный тоннель 2 и дожигался. Стабильность горения пиролизного газа поддерживалась горелкой 4. Полученные в процессе дожигания дымовые газы отводились в дымовую трубу.

Подача воздуха в камеру-реактор 1 и в горелочный тоннель 2 осуществлялась с помощью воздуходувки 5, для измерения расходов воздуха, поступающего в слой отходов биомассы и на горение, использовались счетчики газа 6 и 7.

Регулирование температуры воздуха на входе в камеру-реактор 1 производилось подмешиванием холодного воздуха, контроль температуры осуществлялся с помощью термоэлектрического термометра  $t_1$  типа ХА с диаметром электродов 0,2 мм. Для контроля за общим ходом процесса по высоте камеры-реактора были установлены термоэлектрические термометры  $t_2$ ,  $t_3$  и  $t_4$ .

После завершения процесса пиролиза в полученный древесный уголь с целью его активации подавался пар из парогенератора 8 путем подмешивания пара в воздух. Продолжительность подачи пара составляла около 2 часов. После завершения процесса активации подача паровоздушной смеси прекращалась, камера-реактор 1 герметично

закрывалась и уголь остывал естественным путем. Затем открывалась нижняя крышка камеры-реактора 1, уголь выгружался в герметичную емкость.

Так как рабочий диапазон температур в установке составляет 200–1000 °С, все элементы установки были теплоизолированы.

По окончанию процесса производился отбор проб углистого остатка на анализ. После охлаждения реактора производилось взвешивание углистого остатка.

Была проведена серия, состоящая из 8 экспериментов. На первом этапе экспериментов был установлен диапазон изменения расхода воздуха, в котором в дальнейшем проводились исследования. Критерием выбора расхода воздуха являлся температурный режим и скорость протекания процесса. Для исследуемого сырья удельный расход воздуха составил  $0,4 \div 1,5$  кг/кг сырья.

В ходе экспериментальных исследований процесса пиролиза в плотном слое в режиме фильтрационного горения были получены параметры, позволяющие вести автотермический процесс, требующий энергетического обеспечения только в начальный промежуток времени – при запуске установки, то есть, в момент поджига слоя. После стабилизации выхода пиролизного газа его сжигание происходило без дополнительной подачи природного газа, вторичный воздух на сжигание пиролизного газа подавался в соотношении 4:1.

Важными параметрами процесса являются вид фронта горения и равномерность движения фронта по сечению слоя, которые определяются равномерностью поджига поверхности слоя биомассы и распределением потока воздуха по сечению установки и не зависят от площади поперечного сечения реактора.

Скорость перемещения фронта горения по высоте слоя определялась по изменению температуры в слое, которое фиксировалось термомпарами. При подаче воздуха фронт горения, первоначально расположенный на поверхности слоя, смещается навстречу потоку воздуха, а за фронтом горения остается твердый углистый остаток. При движении фронта горения слой топлива последовательно проходит стадии нагрева, сушки и выхода газообразных компонентов. Выделившиеся газообразные вещества по химическому составу содержат  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ , смолы и другие органические соединения, которые реагируют с кислородом воздуха, образуя фронт горения, температура в котором достигает 600–700 °С. Скорость прохождения фронта горения по высоте слоя составила 6–16 см/час.

По окончании процесса пиролиза всего слоя, при дальнейшей подаче воздуха, начинался процесс газификации коксового остатка, который сопровождался повышением температуры в нижней части слоя до 950–1050 °С. В процессе пиролиза факел в горелке для сжигания пиролизного газа имеет соломенный цвет, ввиду наличия значительного количества смол. При переходе к процессу газификации коксового остатка светимость факела падает и он становится голубого цвета. Отсутствие смол в газе, получаемом в период газификации, делает возможным использование этого газа в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания.

Основными продуктами процесса пиролиза являются пиролизный газ, теплота сгорания которого составляет 14–16 МДж/кг, температура – 450–600 °С и углистый остаток. Для скорлупы грецкого ореха оптимальный удельный расход воздуха, соответствующий максимальному выходу газа, составляет 0,8–1,2 кг/кг. Дальнейшее увеличение расхода приводит к увеличению свободного воздуха в пиролизном газе и снижению температуры в камере-реакторе. Для шелухи гречки наблюдается практически пропорциональная зависимость между расходом воздуха и интенсивностью выхода пиролизного газа. Верхний предел расхода воздуха ограничивается скоростью уноса частиц углистого остатка из камеры-реактора и составляет 3,5–7,0 кг/кг. Температура слоя в процессе пиролиза при таком расходе воздуха находится в диапазоне 650–750 °С.

Базовым результатом процесса является получение древесного угля и физической теплоты продуктов сгорания пиролизного газа. В дальнейшем каждый потребитель, исходя из потребностей своего производства, может использовать физическую теплоту продуктов сгорания пиролизного газа для получения тепловой энергии в виде горячей воды и (или) пара на технологию или бытовые нужды, для подогрева воздуха, а коксовый остаток может быть использован по следующим направлениям:

- в качестве самостоятельного твердого топлива;
- как исходное сырье для последующей газификации или активации;
- для внесения в почву.

Эффективность последнего направления выражается двумя основными факторами. Во-первых, из углеродного баланса выводится часть углерода, которая попадает в землю. Во-вторых, присутствие в почве углистого остатка позволяет задерживать минеральные удобрения, которые легко вымываются и растворяются водой. Это направление интенсивно развивается в странах с существенной долей «бедных» почв. Однако эта технология может быть использована и в странах с «богатými» почвами, для их эффективного восстановления после выращивания определенного вида культур, например, кукурузы, подсолнечника и т.п., которые в процессе роста обедняют почву.

#### Выводы

Проведенные исследования процесса переработки биомассы являются этапом создания технологии комплексной переработки биомассы и ее отходов. Выполнены экспериментальные исследования двухстадийного процесса пиролиза и газификации скорлупы грецкого ореха и гречневой шелухи в плотном слое в режиме фильтрационного горения, позволяющие выбрать рациональные режимы ведения процесса пиролиза биомассы и последующей утилизации теплоты пиролизного газа.

Предложенная технология пригодна для переработки мелкодисперсных отходов сельского хозяйства и промышленности и позволяет получать конечный продукт процесса в зависимости от нужд потребителей.

#### Литература

1. Левин Э.Д. Теоретические основы производства древесного угля. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 152 с.
2. Miller, R. S. and Bellan, J., 1997. A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics. *Combust. Sci. and Tech.* 126, 97–137.
3. Степанов, С.Г. Автотермическая технология получения углеродных сорбентов / С.Г. Степанов, А.Б. Морозов, С.Р. Исламов // *Кокс и химия*. – 2003. – № 7. – С. 48–55.

#### Bibliography (transliterated)

1. Levin E.D. *Teoreticheskie osnovyi proizvodstva drevesnogo uglya*. – M.: Lesnaya promyshlennost, 1980. – 152 p.
2. Miller, R. S. and Bellan, J., 1997. A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics. *Combust. Sci. and Tech.* 126, 97–137.
3. Stepanov, S.G. *Avtotermicheskaya tehnologiya polucheniya uglerodnyih sorbentov* S.G. Stepanov, A.B. Morozov, S.R. Islamov *Koks i himiya*. – 2003. – # 7. – p. 48–55.

УДК 662.743

Губинський М.В., Шишко Ю.В., Шевченко Г.Л., Усенко А.Ю.,  
Федоров С.С., Кремнева К.В.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ ВІДХОДІВ БІОМАСИ  
В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ**

У статті наведено результати експериментальних досліджень процесу піролізу шкарлупи грецького горіху та гречаного лушпиння в щільному шарі в режимі фільтраційного горіння. Встановлено закономірності руху фронту горіння по висоті шару. Отримані результати дозволяють вибрати раціональні режими проходження процесу піролізу біомаси та подальшої утилізації теплоти піролізного газу.

УДК 536.7:66.02

Колбасов А.Н.

## ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОГО И ЭЖЕКЦИОННОГО ТИПА

Постановка задачи.

Повышение технического уровня бронетранспортеров, составляющих основу любой армии, непременно связано с заменой силовых установок. Бронетранспортеры в большей степени используются в странах с высокой температурой окружающей среды. Исходя из этого, любой вариант модернизации сопряжен с выбором силовой установки, которая могла бы при небольших энергетических затратах обеспечивать эксплуатацию без ограничений по тепловым, скоростным и нагрузочным характеристикам. Важным элементом в любой силовой установке является система охлаждения, которая во многом определяется типом двигателя бронетранспортера.

Система охлаждения военной гусеничной машины (ВГМ) в современных условиях, когда потенциальными покупателями на рынке вооружений становятся страны с жаркими климатическими условиями играет доминирующую роль. Данное обстоятельство вместе с назревшей необходимостью модернизации морально и физически устаревшего отечественного парка бронетехники ставит задачу перед разработчиками силовых установок ВГМ интенсифицировать процесс теплообмена при применении более нагруженных силовых агрегатов в минимальных объемах и с минимальными затратами мощности.

Выбор типа системы охлаждения связан в основном с конструктивными особенностями силовых установок. Какому варианту системы охлаждения – вентиляторному или эжекционному отдать предпочтение, должно основываться на ряде факторов, главным из которых является тип двигателя.

С повышением мощности силовых установок военных гусеничных машин неизбежно увеличение тепла, которое необходимо отвести для обеспечения нормального теплового состояния двигателя. Двухтактные двигатели, устанавливаемые на танках украинских разработчиков, характеризуются наличием компрессоров наддувочного воздуха, обеспечивающих рабочий процесс, продувку цилиндров, отвод тепла работу турбины для возврата части мощности, потерянной на привод компрессора.

В то же время энергии выпускных газов достаточно для создания необходимого напора на соплах эжектора системы охлаждения.

Основным направлением для увеличения производительности системы охлаждения может быть увеличение прокачки воздуха через радиаторы системы охлаждения и повышение теплотехнических характеристик собственно радиаторов.

Увеличение производительности радиаторов, как правило, связано с повышением потребляемой мощности либо вентиляторов, либо эжекторов. В случае установки вентиляторной системы охлаждения форсирование может быть проведено увеличением диаметра рабочего колеса либо повышением частоты рабочего колеса.

Изменение потребляемой мощности ( $N_2$ ) В этом случае может быть выражено следующей зависимостью:

$$N_2 = N_1 \frac{j_2}{j_1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5,$$

где  $N_1, j_1, n_1, D_1$  – параметры вентилятора в исходном состоянии (мощность, уд. вес воздуха, частота и диаметр рабочего колеса);  $j_2, D_2, n_2$  – параметры вентилятора при повышении производительности.

Как видно из приведенной зависимости для повышения производительности вентилятора требуется значительное повышение приводной мощности. В то же время производительность при изменении частоты и диаметра рабочего колеса изменяется по следующей зависимости:

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3,$$

что несоизмеримо с затратами мощности, изменяющимися по кубической зависимости от частоты и пятой степени при изменении диаметра рабочего колеса.

Любые варианты увеличения производительности то ли за счет увеличения частоты либо диаметра рабочего колеса требуют больших конструктивных изменений. Рассматривая при этом возможные пути реализации повышения производительности видно, что они весьма ограничены.

В случае установки эжекционной системы охлаждения форсирование эжектора для получения требуемого расхода воздуха через пакет радиаторов возможно за счет оптимизации целого ряда параметров самого эжектора. В этом случае появляется целое множество конструктивных решений создания эжектора для конкретной силовой установки.

Форсирование эжектора возможно при значительно меньших энергетических затратах на приращение производительности из-за гораздо большего количества параметров, влияющих на характеристику эжектора.

В качестве источников повышения энергии эжектора следует рассматривать следующие элементы:

- сопловой аппарат (размер, форма истечения, количество сопел);
- камера смешения (формы камеры смешения, ее длина, масштаб эжектора);
- угол раскрытия диффузора для снижения потерь статического давления;
- форма подрадиаторного пространства и приемной камеры;
- аэродинамическое сопротивление пакета радиаторов и входных устройств.

Уравнение эжектора можно представить в виде

$$\overline{\Delta P_{\text{э}}} = a + b \left( q \sqrt{\Delta} \right)^2 - c \left( 1 + q / \sqrt{\Delta} \right)^2.$$

Это наиболее простое и полное выражение, характеризующее геометрические, теплотехнические и гидравлические характеристики эжектора в данном уравнении:

$\overline{\Delta P_{\text{э}}}$  – статический напор эжектора;  $a, b$  и  $c$  – коэффициенты уравнения эжектора;  $q$  – коэффициент эжекции, равный отношению:

$$\frac{G_2}{G_1},$$

где  $G_2$  – расход эжектируемого воздуха;  $G_1$  – расход эжектирующего воздуха.

Коэффициенты  $a, v$  и  $c$  характеризуют качество самого эжектора, изменение величин которых дает возможность приблизить эжектор к требуемым характеристикам по напорности и производительности по воздуху.

Важным критерием является его масштаб – " $m$ ", который равен соотношению:

$$m = H_k \frac{B_{\text{э}}}{fc},$$

где  $H_k$  – высота камеры смешения;  $B_{\text{э}}$  – ширина проходного сечения камеры смешения;  $fc$  – суммарная площадь сопел соплового аппарата эжектора.

Выбрав масштаб эжектора, коэффициент " $a$ " определится из формулы:

$$a = \frac{2}{m};$$

коэффициент " $v$ " определяет минимальные потери давления за счет оптимизации входного участка камеры смешения и выражается следующей зависимостью

$$v = \frac{(1 - \xi_{\text{вх}})(m - 2)}{[m(m - 1)^2]},$$

где  $\xi_{\text{вх}}$  – коэффициент сопротивления входного участка.

Коэффициент " $c$ " определяет условия выхода газа в диффузор и геометрические особенности диффузора с точки зрения полного использования энергии эжектора с минимальными потерями статического давления.

Для этого для любого варианта эжектора вычисляется коэффициент качества " $A$ " по уравнению

$$A = (2 - \varphi_{\partial}) K_3 + \xi,$$

где  $\varphi_{\partial} = [1 - 2(K_3 - 1)] \varphi_{\partial 1}$ .

Величины  $\varphi_{\partial 1}$  и  $K_3$  определяются экспериментальными исследованиями и, как правило, равны 0.92 и 1.04 соответственно. Тогда коэффициент " $C$ " легко вычислить по формуле:

$$C = \frac{A}{m^2}.$$

Из приведенных формул значимости коэффициентов  $a, v$  и  $c$  видно, что именно они дают возможность оптимально в условиях реальной компоновки эжектора и системы охлаждения выбрать такое сочетание размеров, которое могло бы удовлетворить условиям создания необходимой производительности эжектора, для обеспечения теплового равновесия двигателя при работе на внешней характеристике в условиях эксплуатации при высоких температурах окружающего воздуха.

Сравнивая возможные варианты повышения эффективности системы охлаждения в случае применения одного из известных вариантов – вентиляторного или эжекционного типа видно, что в случае использования вентиляторного варианта, форсирование возможно за счет двух направлений – повышения частоты вентилятора или увеличения диаметра колеса. Однако в обоих случаях требуются большие затраты мощности.

Эжекционный вариант применяется для двигателей, которые имеют турбокомпрессоры или компрессоры наддувочного воздуха с высокой степенью повышения давления. Двигатели семейства 5ТДФ и его модификаций наиболее приспособлены для работы с эжекционными системами охлаждения. В этом случае за счет оптимизации геометрических характеристик эжектора без увеличения затрат мощности, возможно увеличение расхода эжектируемого воздуха для обеспечения теплового равновесия двигателя в условиях высоких температур окружающего воздуха.

Наглядным примером реализации сказанного являются танки с эжекционной системой охлаждения Т-64 и его модификации, Т-80УД и Т-84.

следуя основному принципу создания эжекторов, который основывается на оптимизации геометрических размеров при заданной энергии газа, возможно получение требуемого количества эжектируемого воздуха.

#### Выводы

1. Модернизация объектов бронированной техники в настоящее время требует более мощных двигателей, что обеспечивает высокую скорость движения и улучшение параметров подвижности.

2. Для обеспечения теплового равновесия двигателя требуется создание более эффективных систем отвода тепла в условиях высоких температур окружающего воздуха и максимальных нагрузок.

3. В случае применения вентиляторных систем охлаждения, форсирование возможно либо, увеличением диаметра рабочего колеса, либо частоты его вращения. В обоих случаях это связано с ростом потребляемой мощности на привод.

4. Форсирование эжекционной системы возможно за счет оптимизации эжектора по геометрическим размерам  $a, b$  и  $c$ , что подтверждено на примере танков Т-64, Т-80УД и Т-84.

#### Литература

1. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Климов В.Ф. Техническая термодинамика и теплотеплопередача в компактных теплообменниках транспортных машин, Харьков 2006 г.

#### Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B., Borisyuk M.D., Klimov V.F. Tehnicheskaya termodinamika i teploperedacha v kompaktnyih teploobmennikah transportnyih mashin, Harkov 2006 g.

УДК 536.7:66.02

Колбасов О.М.

### **ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ТА ЕЖЕКЦІЙНОГО ТИПУ**

У статті викладені основні напрямки модернізації об'єктів броньованої техніки та показані переваги використання систем ежекційного типу для двигунів з турбонаддувом або компресорами з високим ступенем підвищення тиску.

УДК 621.45.02.024:05.054

Анипко О.Б., Логинов В.В.

**АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ОБЛАСТИ СРЕЗА  
ВЫХОДНОГО УСТРОЙСТВА ДВИГАТЕЛЯ,  
РАСПОЛОЖЕННОГО ПОД КРЫЛОМ САМОЛЕТА**

*Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба*

Решение проблемы повышения топливной экономичности двигателей летательных аппаратов (ЛА), привело к использованию на дозвуковых транспортных самолетах турбовинтовентиляторных двигателей (ТВВД) [1–3]. Опыт эксплуатации самолетов с винтовыми двигателями показал, что использование винтов в роли движителей обеспечивает высокую экономичность силовой установки на крейсерском режиме полета. Исследования летно-технических характеристик дозвуковых самолетов показали, что применение ТВВД дает возможность снизить расход топлива на 10–25 % по сравнению с перспективными двухконтурными двигателями и уменьшить длину разбега самолета за счет увеличения несущих свойств крыла, интегрированного с силовой установкой [4–5].

Однако интеграция силовой установки с ТВВД и крыла предполагает такое конструктивно-компоновочное решение системы "винт+крыло+двигатель", которое обеспечивает наилучшие летно-технические характеристики ЛА. При этом необходимо учитывать дополнительные аэродинамические силы, обусловленные взаимодействием крыла, струи от винтов и газового потока, который вытекает из выходного устройства двигателя. Величины этих сил зависят от тяги винтов, скорости полета, геометрии системы "винт+крыло" и мотогондолы, параметров струи газового потока [6–11].

Это приводит к необходимости исследования вопросов увеличения подъемной силы системы "винт+крыло+двигатель", а также исследования параметров рабочего процесса в области расположения двигателя под крылом ЛА [12–20].

Однако подходы по исследованию аэродинамических характеристик выше приведенных систем не учитывают температуру струи из выходного устройства силовой установки. Анализ газодинамической картины течения с подводом тепла вблизи внешней поверхности ЛА показывает, что наличие струи с высокой температурой существенным образом изменяет картину течения вблизи закрылков [21–24].

Для исследования аэродинамических характеристик системы "винт + крыло + двигатель", а также течения в области закрылков с учетом температуры струи из выходного устройства двигателя, рассмотрена конструктивно-компоновочная схема самолета Ан-70 [1]. Исследуется авиационный двигатель типа Д-27 с двухрядным расположением винтов. Расчетная область крыла самолета и силовой установки с двигателем показана на рис. 1 и включает часть крыла с одним двигателем. Показано сечение, где изменяются параметры набегающего потока воздуха при работе винтов. Течение потока воздуха через двухрядный винт рассчитывается отдельно [6].

Для проведения исследований выбрано два варианта расчетных областей:

- крыло с двигателем с вытекающей горячей струей;
- крыло с двигателем без вытекающей горячей струи.

Расчетный случай предполагает полет самолета типа Ан-70 на высоте  $H=1000$  м со скоростью  $M_n=0,4$ . Параметры атмосферы на данной высоте и скорости полета име-

юг значение:  $T_H = 281,65 \text{ }^\circ\text{K}$ ;  $P_H = 89906,7 \text{ Н/м}^2$ ;  $\rho_H = 1,1117 \text{ кг/м}^3$ ;  $a_H = 336,4 \text{ м/с}$ ;  $V_H = 134,6 \text{ м/с}$ ;  $P_H^* = 100385,5 \text{ Н/м}^2$ ;  $T_H^* = 290,7 \text{ }^\circ\text{K}$ .

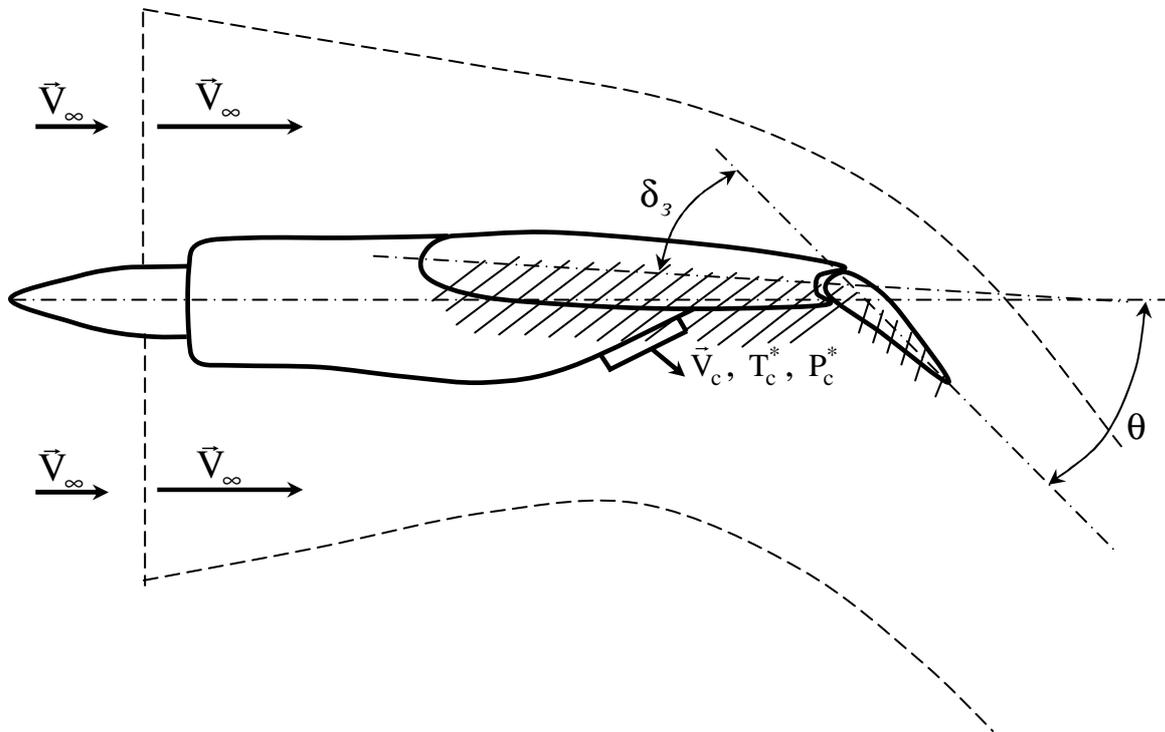


Рисунок 1 – Расчетная схема модели обтекания крыла и элерона

Газовый поток вытекает из выходного устройства с параметрами:  $c_c=120 \text{ м/с}$ ;  $M_c=0,375$ ;  $P_c^* = 90857 \text{ Па}$ ;  $T_c^* = 600 \text{ }^\circ\text{K}$ .

Результаты расчетов представлены в виде изолиний полного и статического давления, полной и статической температуры, чисел Маха (рис. 4–7) для двух вариантов: с прямым ( $\delta_3=0^\circ$ ) и отклоненным закрылком ( $\delta_3=45^\circ$ ). Влияние распределения полной температуры с наличием и без вытекающей струи из выходного устройства двигателя показаны на рис. 8–11.

Анализ течения показывает, что неоднородность потоков существенным образом влияет на картину течения в области расположения выходного устройства двигателя. Газовая струя, которая имеет высокую температуру по сравнению с набегающим потоком, образует воздушную границу между закрылком и горячей струей. Такое течение сопровождается повышением температуры в области верхнего среза выходного устройства, а также снижением полного и статического давления. Это связано с циркуляцией скорости потоков в нижней части крыльевого профиля. Набегающий поток поворачивает горячую струю потока газа к поверхности крыла (рис. 5), что приводит к образованию простеночной вихревой области [22–23]. Если угол отклонения закрылка  $\delta_3=0^\circ$ , тогда вихрь, который образовался, частично сносится набегающим потоком. В случае  $\delta_3=45^\circ$  вихрь становится большим по размеру и существенным образом влияет на создание подъемной силы крыла. Кроме того, газовая струя, которая вытекает из выходного устройства под углом к набегающему потоку, создает тепловое и воздушное сопротивление, которое отрицательно влияет на крейсерскую скорость полета ЛА.

Картина течения в районе среза выходной части двигателя довольно сложная и при установленном движении потоков. Для определения сопротивления системы "крыло + мотогондола" важно знать явления, которые происходят в ближнем следе за срезом сопла, его длина [23]. Одной из характеристик ближнего следа есть задняя критическая точка (точка присоединения потока к твердой поверхности или точка смыкания двух потоков за соплом). Положения этой точки определяет размеры донной области выходного устройства и зависит от числа  $M$  набегающего потока. В работе [24] экспериментально показано, что при увеличении числа  $M$  внешнего потока (от  $M = 0,25$  до  $M = 0,7$ ) точка отрыва потока двигается вверх по потоку, а точка присоединения – вниз по потоку. Относительная толщина вытеснения пограничного слоя слабо влияет на положение точек отрыва и присоединения потока. Это объясняется влиянием двух противоположных факторов. С одной стороны, для большей толщины вытеснения вследствие меньшей энергии газа в пограничном слое под влиянием неблагоприятного градиента давления присутствует тенденция к более раннему отрыву потока. С другой стороны, увеличения толщины вытеснения эквивалентно обтеканию более плавного тела невязким потоком, который приводит к уменьшению неблагоприятного градиента давления.

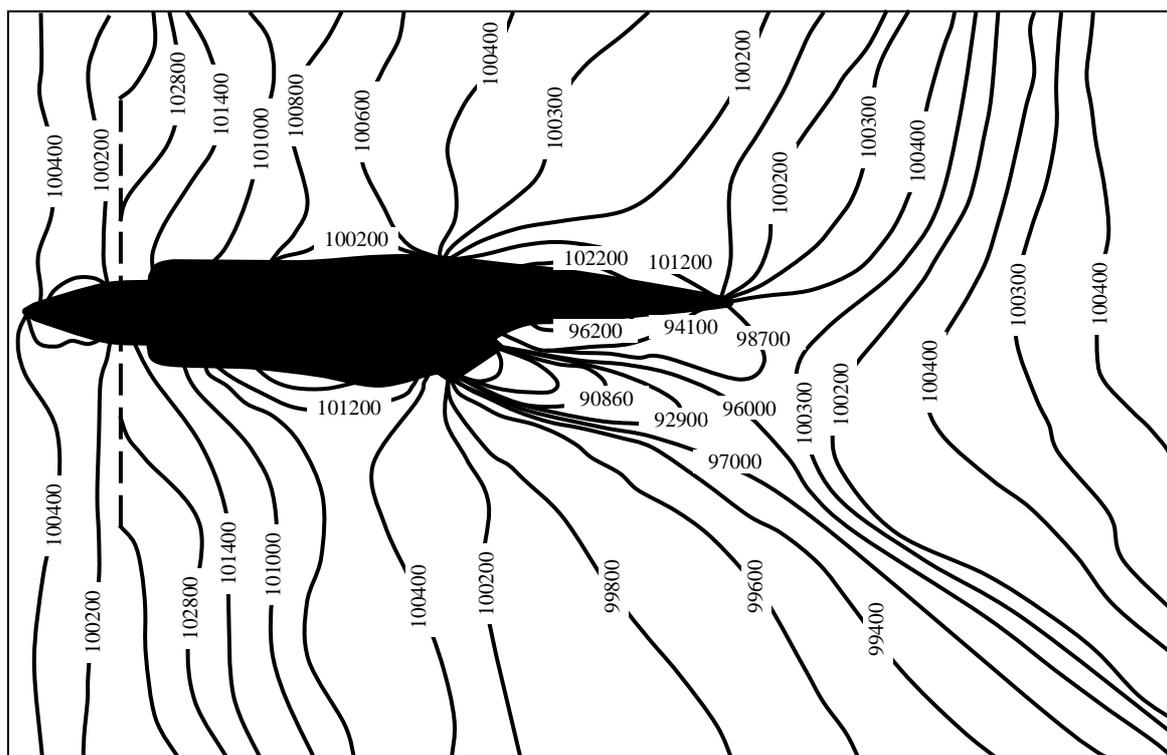


Рисунок 2 – Изолинии полного давления в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=0^\circ$ )

При наличии донного уступа между элементами планера и выходным устройством взаимодействие реактивной струи с внешним потоком приводит к изменению величин донного, внешнего и полного сопротивлений. В зависимости от размеров донной области влияние реактивной струи на все виды сопротивлений может быть противоположным по знаку. При относительно небольших размерах донной области увеличение полного давления в реактивной струе приводит к уменьшению сопротивления хвостовой части, то есть к положительной интерференции, при больших размерах донной области – к увеличению сопротивления хвостовой части.

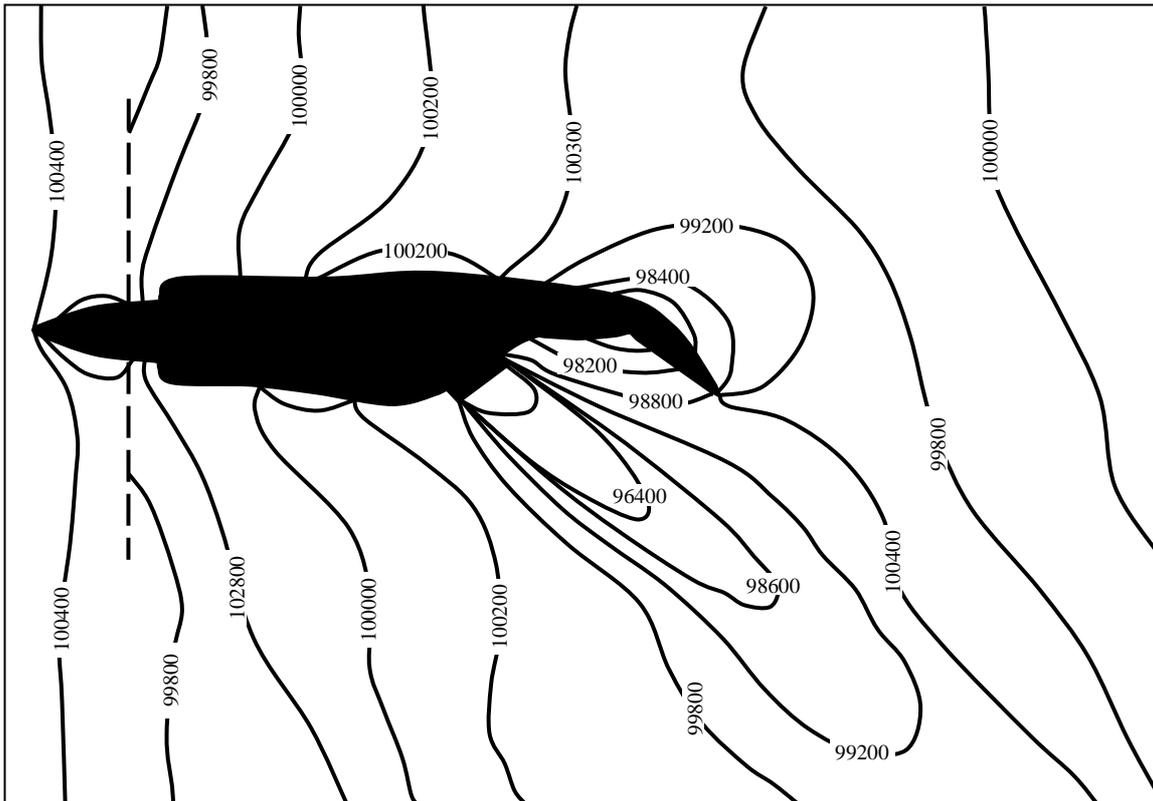


Рисунок 3 – Изолинии полного давления в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=45^\circ$ )

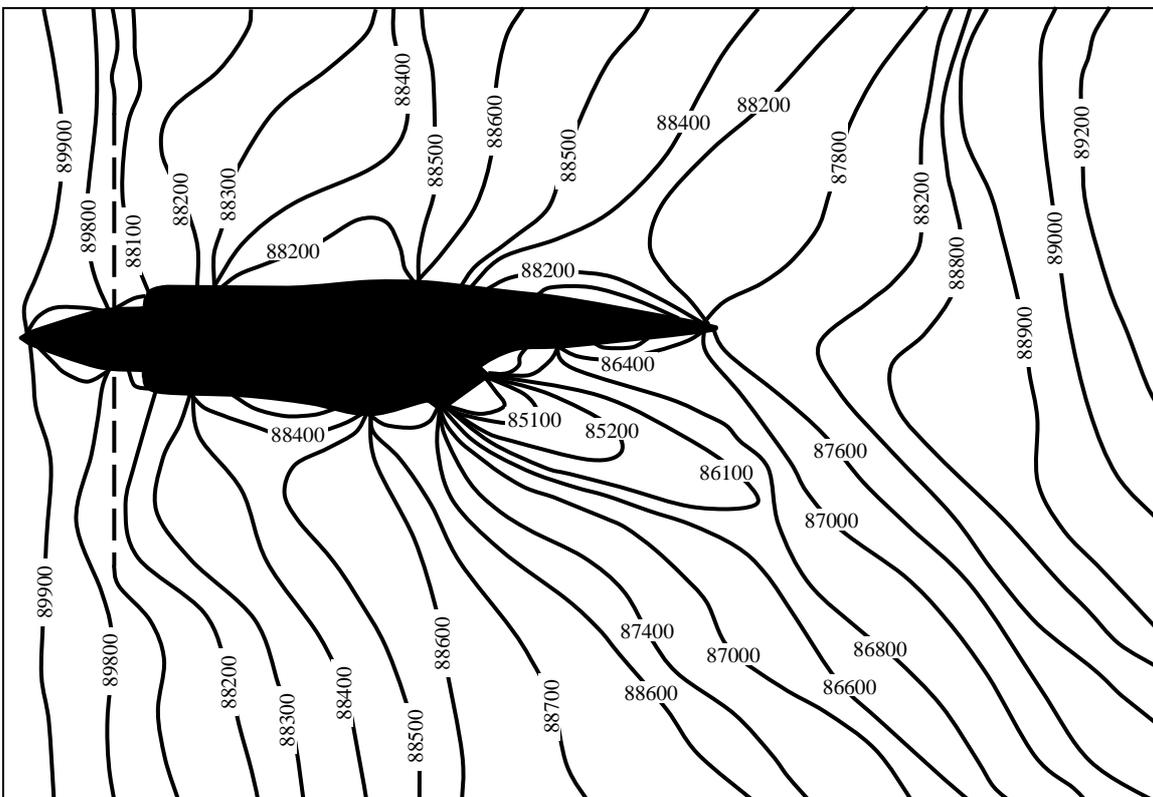


Рисунок 4 – Изолинии статического давления в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=0^\circ$ )

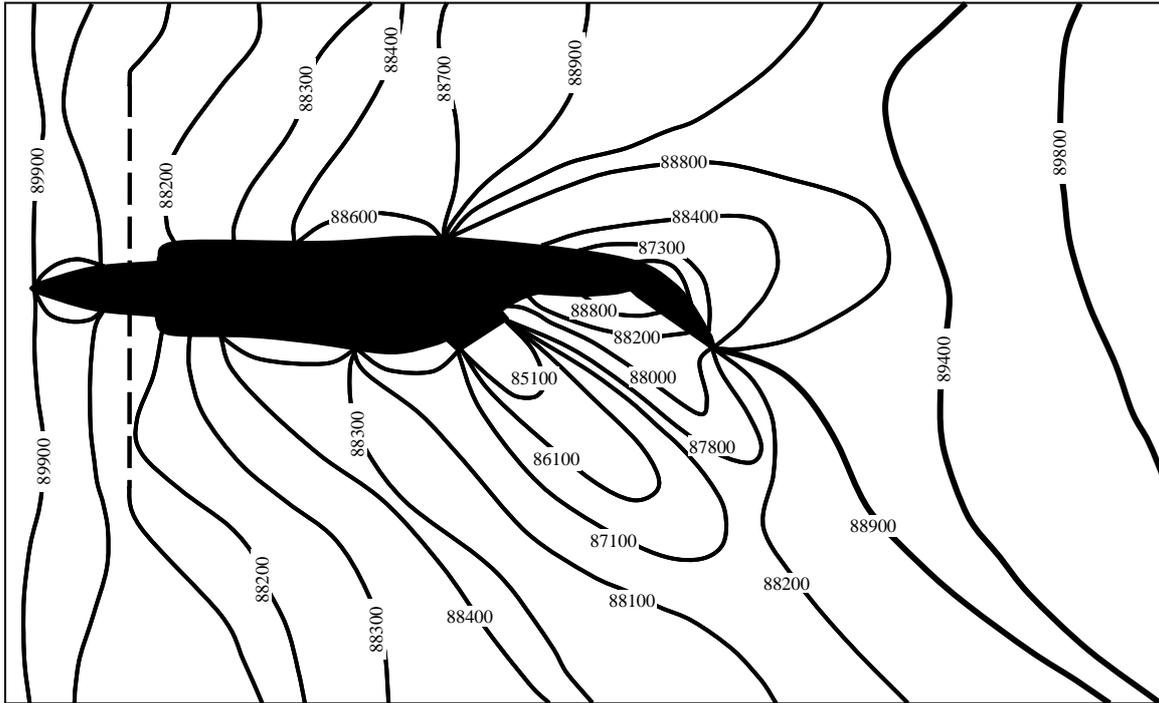


Рисунок 5 – Ізолінії статического тиску в продольному сеченні розрахункової області ( $\delta_c=45^\circ$ )

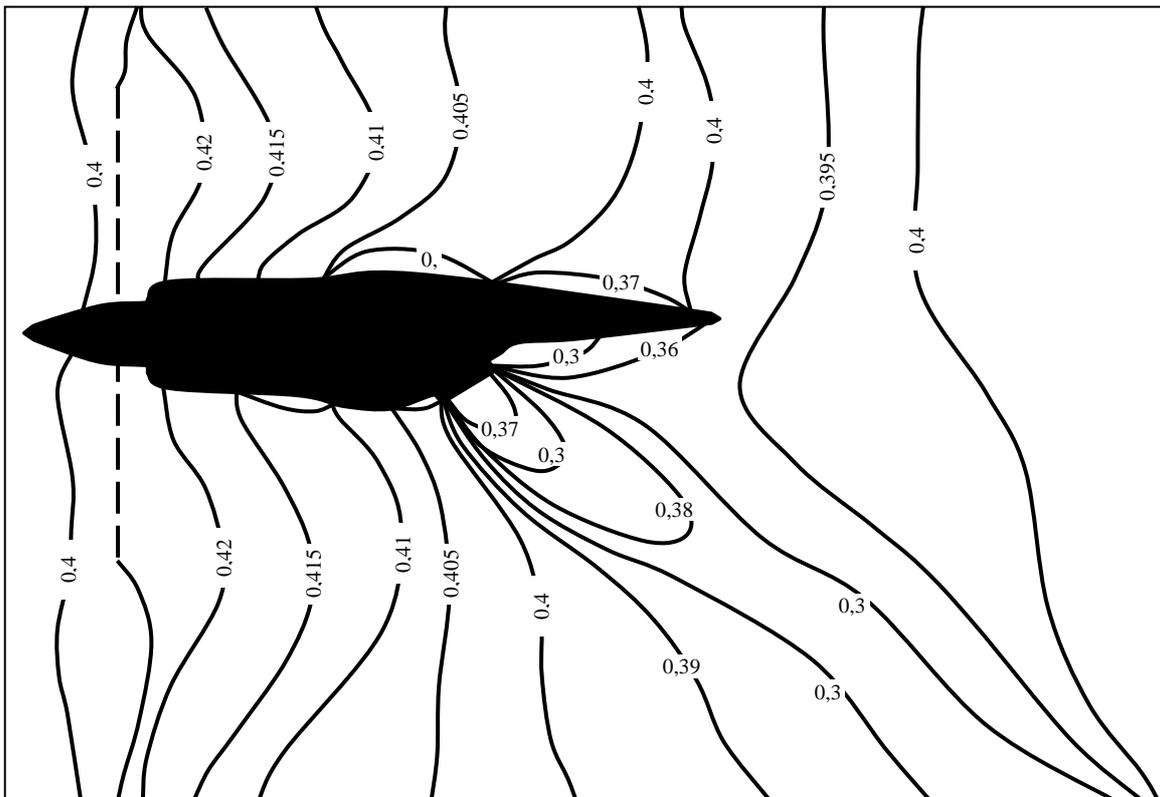


Рисунок 6 – Ізолінії чисел Маха в продольному сеченні розрахункової області ( $\delta_c=0^\circ$ )

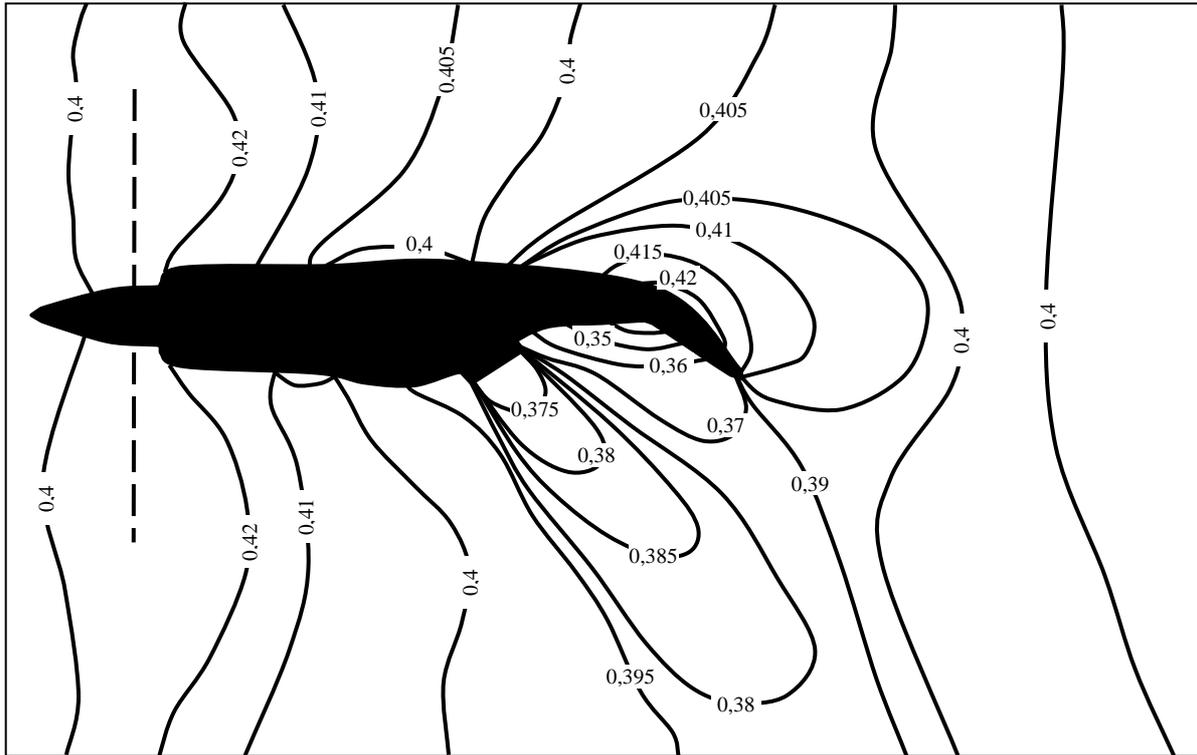


Рисунок 7 – Изолинии чисел Маха в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=45^\circ$ )

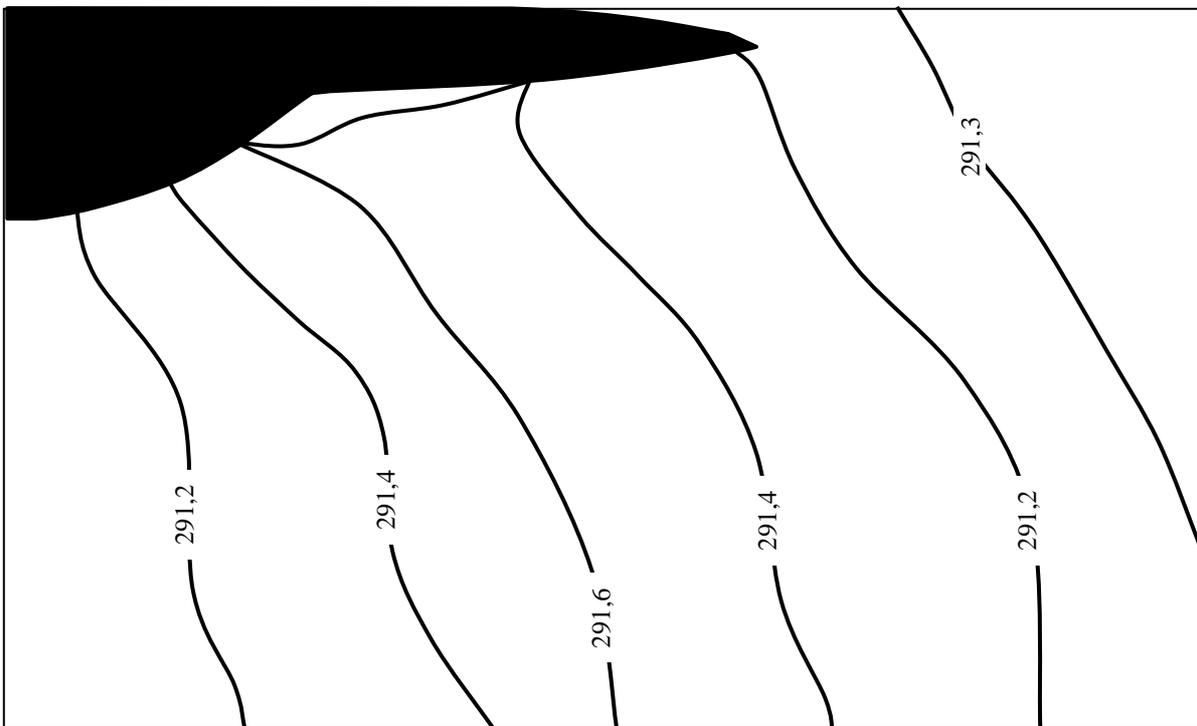


Рисунок 8 – Изолинии полной температуры в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=0^\circ$ , без истечения горячей струи)

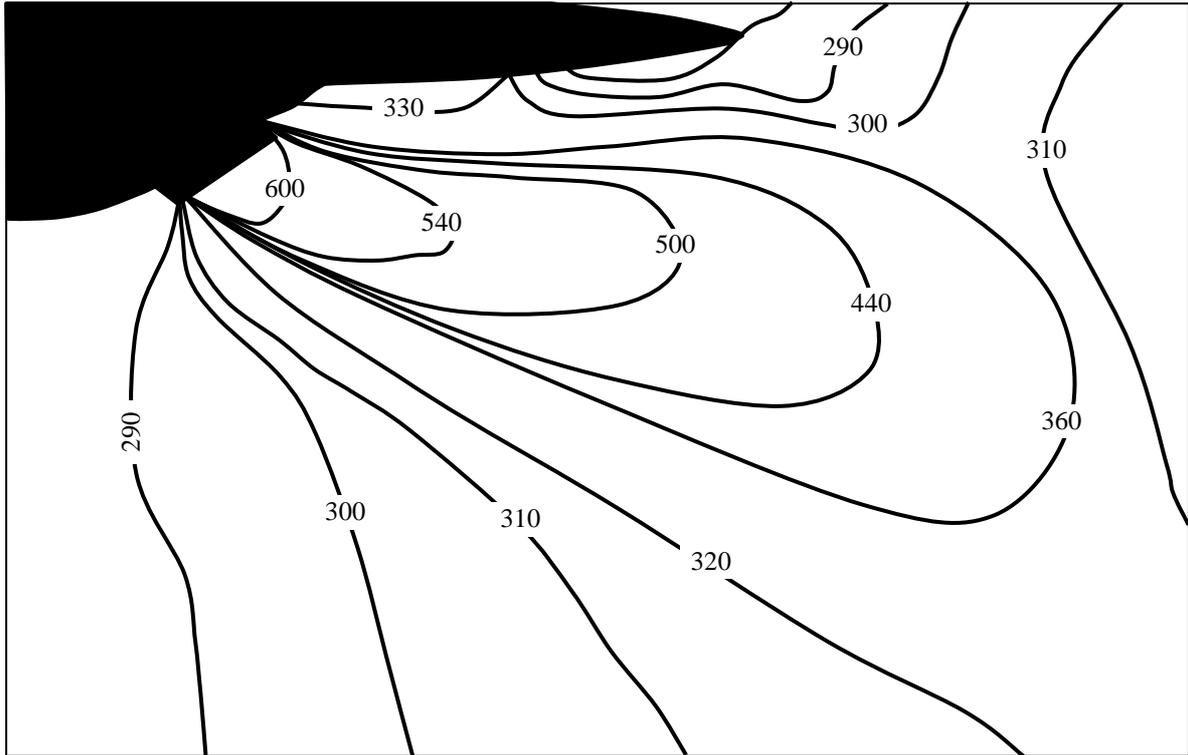


Рисунок 9 – Изолинии полной температуры в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=0^\circ$ , с истечением горячей струи)

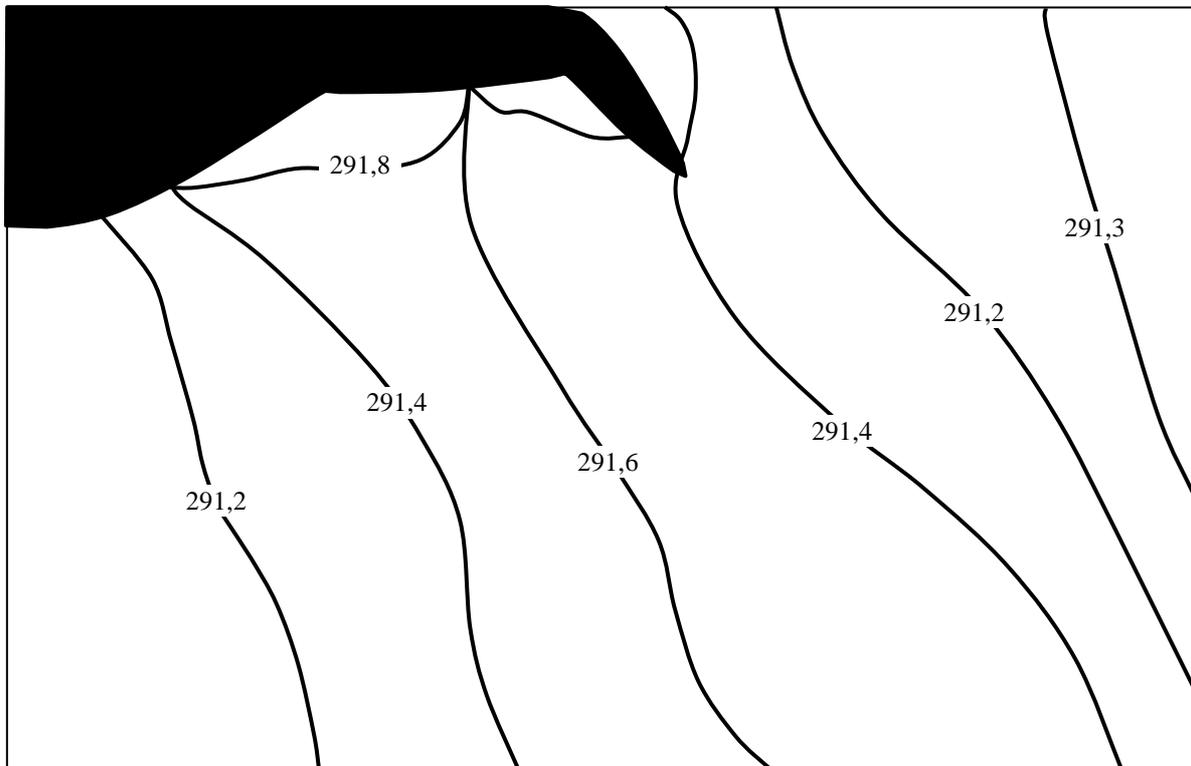


Рисунок 10 – Изолинии полной температуры в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=45^\circ$ , без истечения горячей струи)

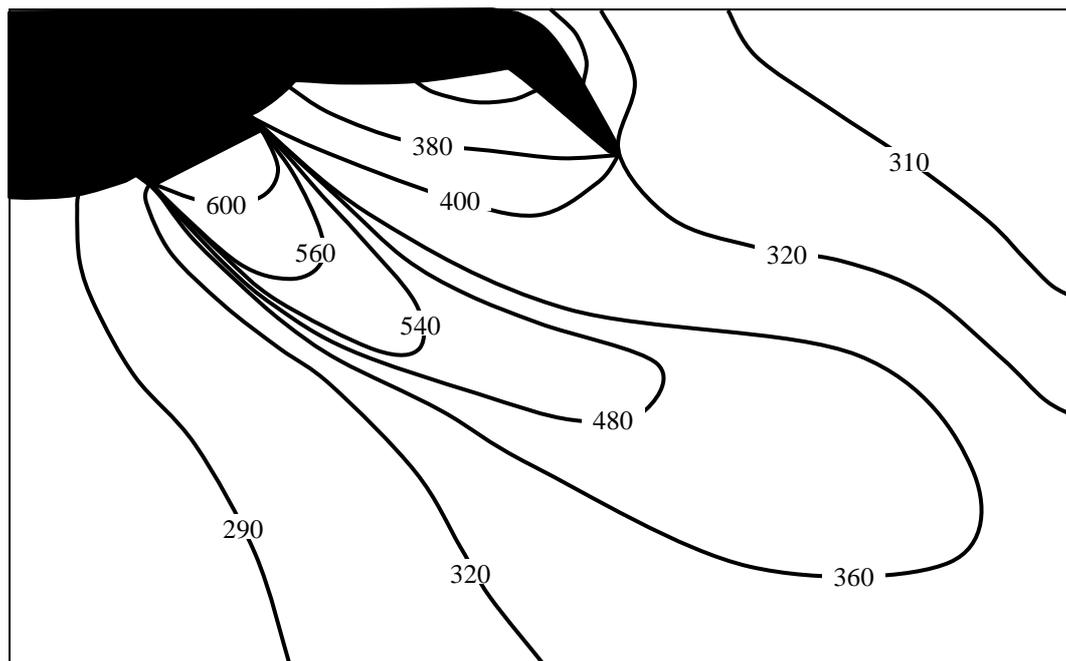


Рисунок 11 – Изолинии полной температуры в продольном сечении расчетной области ( $\delta_c=45^\circ$ , с истечением горячей струи)

При относительно небольших размерах донной области, это уменьшение величины сопротивления с ростом относительного давления в реактивной струе связано с увеличением угла встречи границы струи с внешним потоком. При больших размерах донной области начинает преобладать эжектирующее действие реактивной струи и сопротивление хвостовой части уменьшается [24]. С увеличением размеров донной области (при постоянном давлении в реактивной струе) существует относительный диаметр донного среза, при котором донное сопротивление минимально, однако полное сопротивление хвостовой части при дозвуковых скоростях увеличивается вследствие увеличения внешнего сопротивления [25–29].

Таким образом, рассматривая рабочий процесс в области расположения среза выходного устройства силовой установки под крылом самолета, можно сделать следующие выводы:

- а) при исследованиях подъемной силы системы "винт+крыло+двигатель" необходимо учитывать температуру газа, вытекающей струи;
- б) в области среза выходного устройства силовой установки, расположенного под крылом самолета необходимо ликвидировать вихревую область в нижней части крыла, чтобы обеспечить минимальное общее сопротивление и увеличить подъемную силу системы "винт+крыло+двигатель".

В связи с этим целесообразно провести исследование рабочего процесса в области выходного устройства силовой установки под крылом самолета с другим выходным устройством. Исходя из предварительного анализа параметров газового и воздушного потоков, предлагается новая конструктивно-компоновочная схема смесительно-выходного устройства двигателя (рис. 12). Физическая сущность рабочего процесса в новой конструкции состоит в том, что газовая струя, вытекающая из двигателя, смешивается с потоком воздуха через эжекторные щели и направляется по оси установки крыла [25].

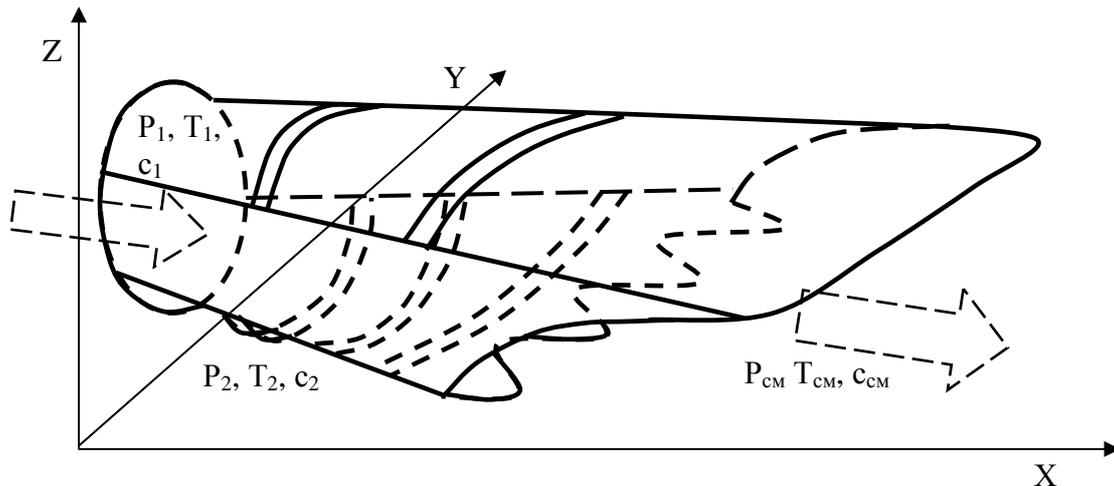


Рисунок 12 – Схема смесительно-выходного устройства двигателя

Смесительно-выходное устройство представляет собой канал, который плавно переходит из круглого сечения в прямоугольное с волнообразной поверхностью в нижней части (рис. 12). Параметры рабочего процесса в продольном сечении приведены на рис. 13.

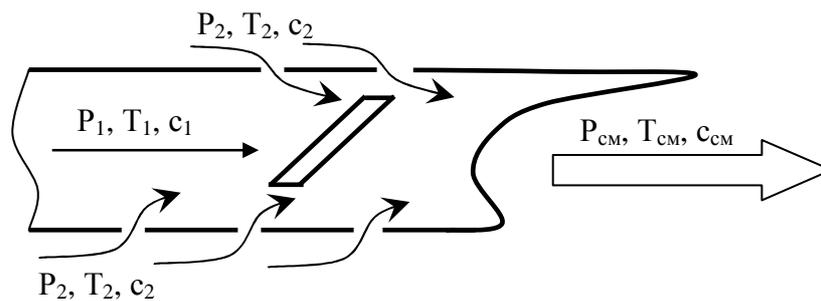


Рисунок 13 – Параметры рабочего процесса в продольном сечении смесительно-выходного устройства

Основная струя горячего газа с параметрами  $P_1, T_1, c_1$  вытекает из затурбинного сечения двигателя и течет по каналу, смешиваясь с холодным воздухом с параметрами  $P_2, T_2, c_2$ , который эжектируется через щели в нижних, верхних и боковых поверхностях выходного устройства. Схема установки и рабочий процесс в области расположения исследуемого смесительно-выходного устройства под крылом показаны на рис. 14.

Рассматривается полет самолета на той же высоте и при тех же условиях, которые задавались в предыдущей задаче. Газовый поток имеет те же параметры.

Изолинии статического давления и полной температуры приведены на рис. 15–18. Видно, что в области среза сопла статическое давление увеличивается, вследствие небольшого уменьшения скорости вытекающего потока. Процесс торможения происходит по счет перемешивания эжектируемого воздуха с газовым потоком, в результате чего, полное давление потока уменьшается.

При угле отклонения закрылка  $\delta_c=45^\circ$ , нижняя часть его обтекает безотрывно. Это позволяет утверждать, что возможный отрыв потока будет располагаться на задней кромке закрылка. Положения точки отрыва пограничного слоя на верхней поверхности

закрылка определяется его углом отклонения, скоростью и вязкостью потока. В данном случае точка отрыва потока располагается на верхней поверхности закрылка (рис. 19).

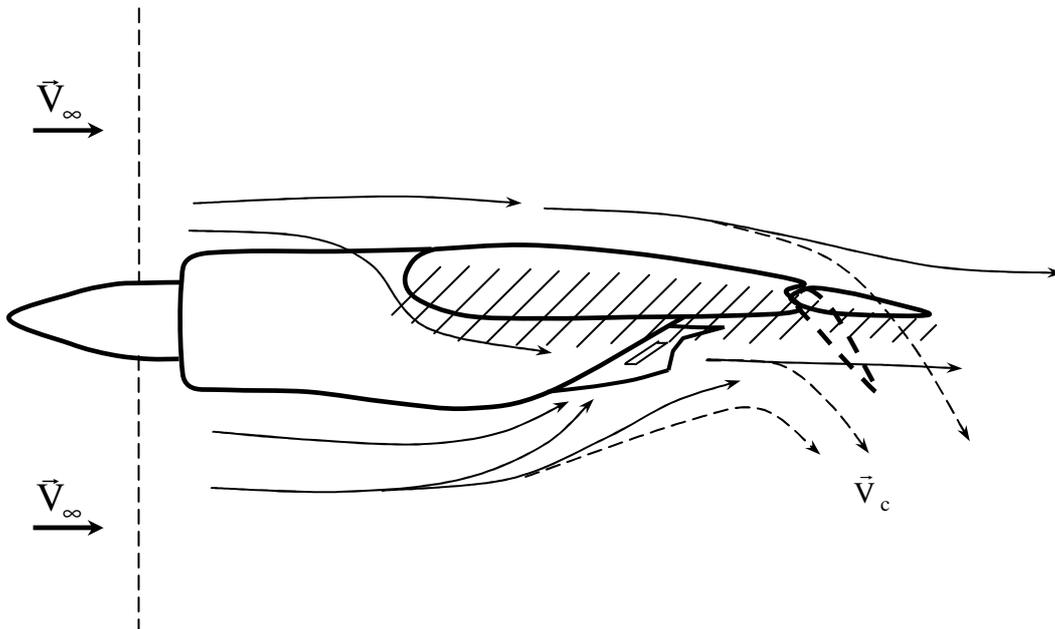


Рисунок 14 – Схема рабочего процесса в области расположения смесительно-выходного устройства под крылом

Необходимо отметить, что установка нового смесительно-выходного устройства позволила снизить коэффициент аэродинамического сопротивления с 0,0125 до 0,0119.

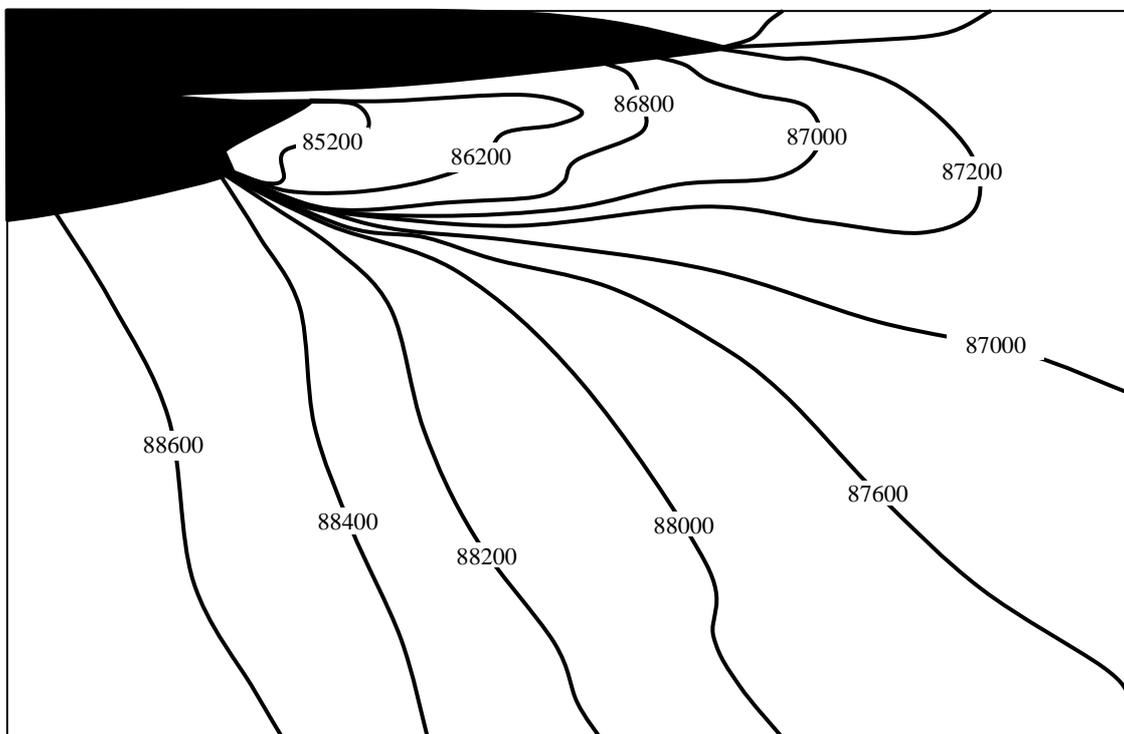


Рисунок 15 – Изолинии статического давления ( $\delta_c=0^\circ$ )

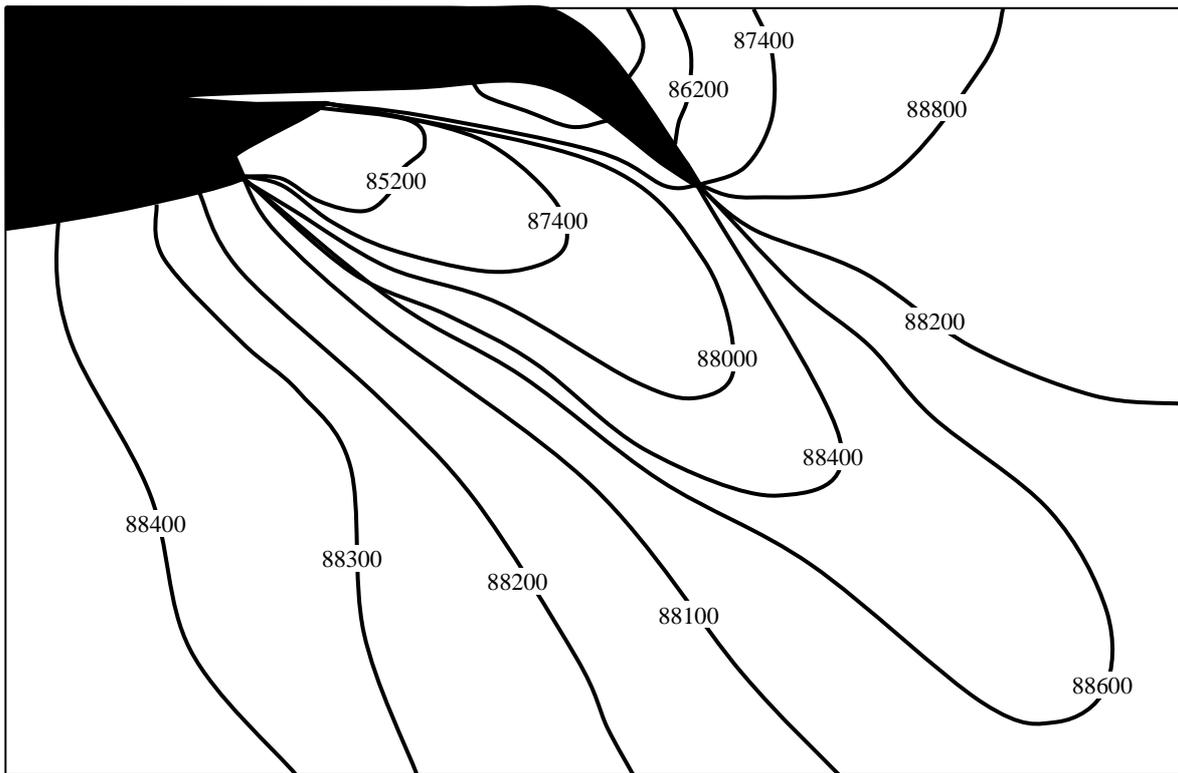


Рисунок 16 – Ізолінії статического тиску ( $\delta_c=45^\circ$ )

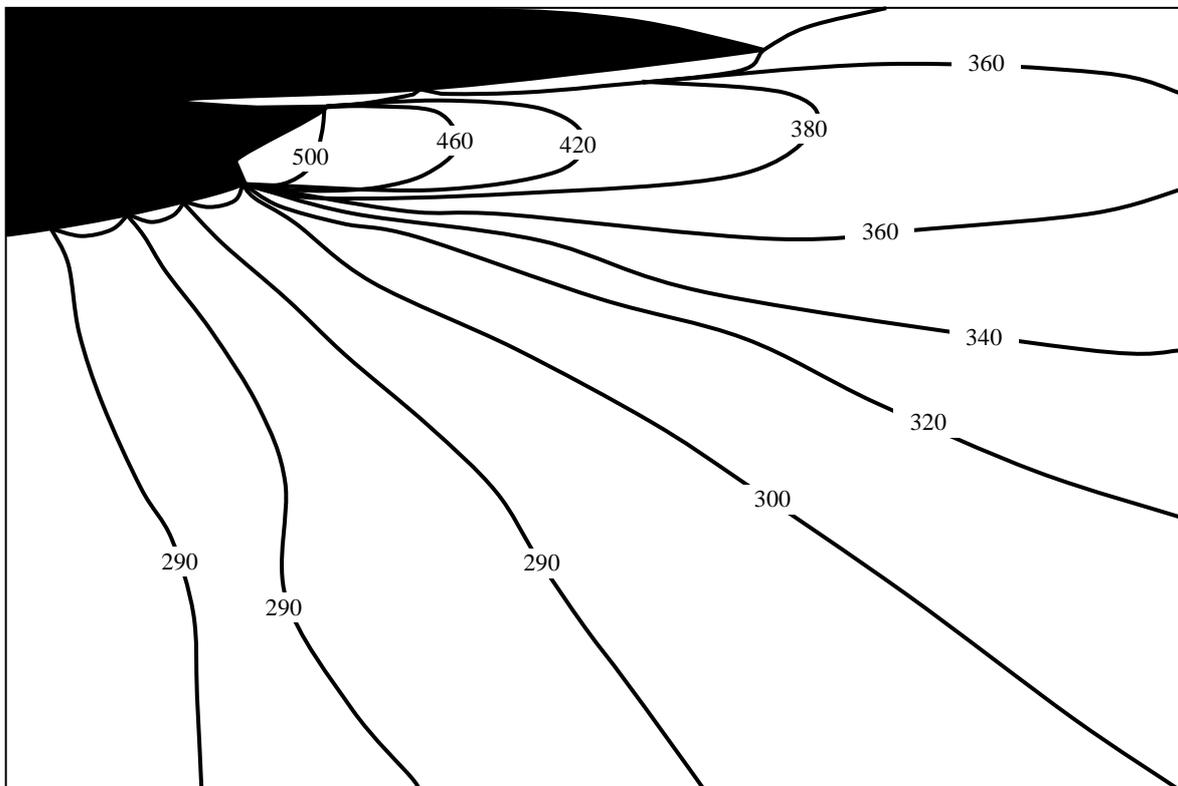


Рисунок 17 – Ізолінії повної температури ( $\delta_c=0^\circ$ )

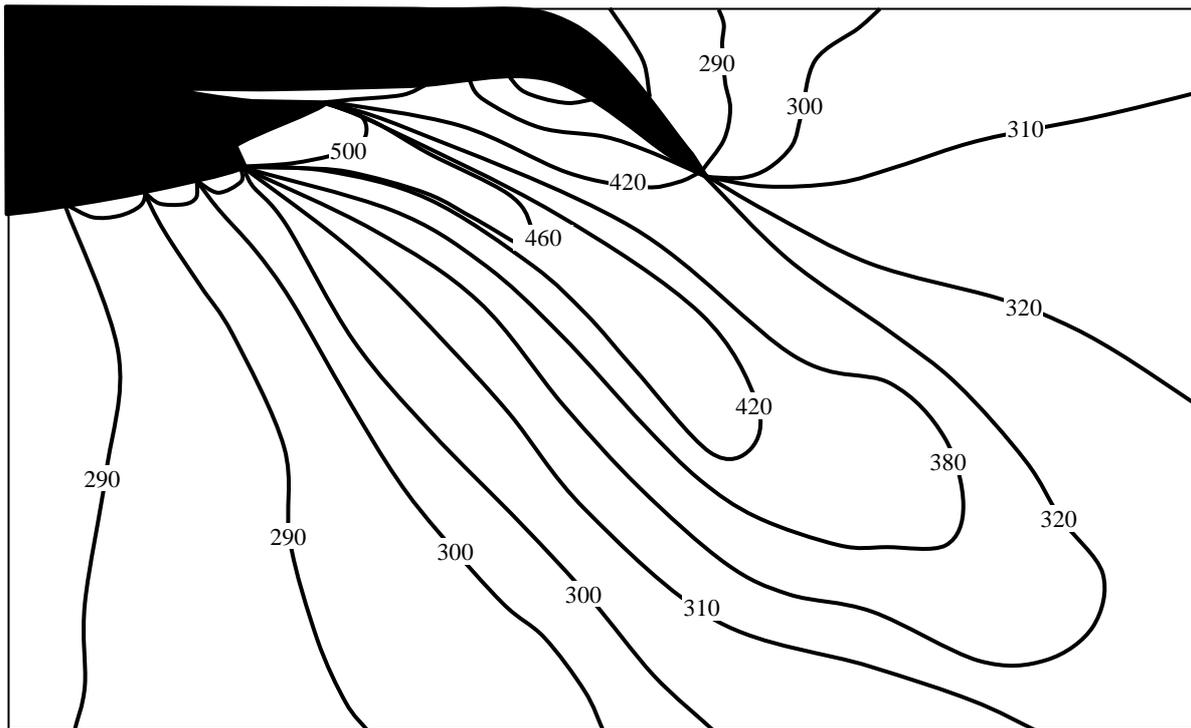


Рисунок 18 – Изолинии полной температуры ( $\delta_c=45^\circ$ )

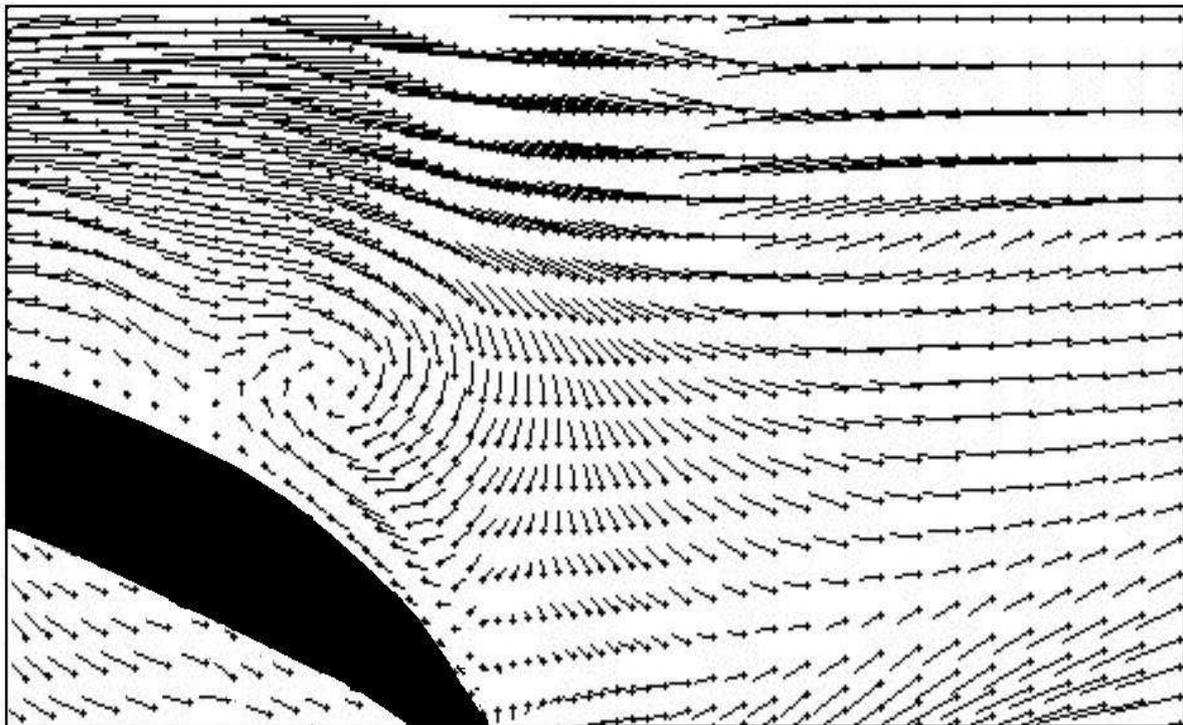


Рисунок 19 – Векторное поле скоростей на верхней поверхности закрылка

Результаты исследований показали, что разработанный подход позволяет:

- провести параметрические исследования течения в смесительно-выходном устройстве двигателя на основе численного расчета течения потоков и проанализировать полученные результаты;

- определить поля параметров течения и проанализировать картину смещения потоков в смесительно-выходном устройстве двигателя;
- определить параметры рабочего процесса в области расположения смесительно-выходного устройства под крылом самолета;
- оценить интегральные характеристики конструктивно-компоновочной схемы “винт+крыло+мотогондола”.

В данной работе проведены исследования одного режима работы силовой установки. Большой интерес представляют взлетный и посадочный режимы работы СУ, а также работа взлетно-посадочной механизации крыла на этих режимах.

#### Литература

1. Перспективи розвитку військово-транспортної авіації. //Військо України. – № 7–8. – 2001. – С. 35–37.
2. Харченко О.В. Тенденції розвитку військової авіації на початку ХХІ ст. // Наука і оборона. – 2003. – №3. – С. 37–45.
3. Кюхеман Д. Аэродинамическое проектирование самолетов. – М.: Машиностроение. 1983. – 656 с.
4. Золотько Е.М. Подъемная сила крыла, обдуваемого струей от винтов, при изменении коэффициента нагрузки на ометаемую винтом площадь от 0 до  $\infty$  // Труды ЦАГИ, вып. 2235, 1984. – С. 3–10.
5. Авиационные двигатели / Под ред. И.Г. Шустова. М.: ООО ИД “Аэросфера”. 2007. – 328 с.
6. Украинец Е.А., Логинов В.В. Расчетное исследование аэродинамических характеристик воздушного винта АВ–140 // Збірник наукових праць ХУПС, №2(8). – 2006. – С. 10–13.
7. Павловец Г.А., Ивантеева Л.Г. Расчет аэродинамических характеристик профиля при дополнительном обдуве струей сжимаемого газа. //Труды ЦАГИ, вып. 2235, 1984. – С. 32–45.
8. Ивантеева Л.Г., Морозова Е.К., Павловец Г.А. Расчет подъемной силы тонкого профиля с закрылком при обдуве струей. // Труды ЦАГИ № 2097, 1981. – С. 7–26.
9. Соков В.Н. Расчет и воспроизведение на стенде летного нагружения воздушного винта от косо́й обдувки. // Труды ЦАГИ № 2142, 1982. – 35 с.
10. Смирнов А.В. К вопросу о положении винта над стреловидным крылом в трансзвуковом потоке. //Труды ЦАГИ, вып. 2534, 1994. – С. 35–43.
11. Золотько Е.М. Приближенный расчет дополнительной подъемной силы при обдувке крыла струей от винтов. //Труды ЦАГИ, вып. 1452, 1973. – С. 12–26.
12. Лисейцев Н.К., Арджоманди М. Влияние поворота вектора тяги двигателей на длину взлетной дистанции транспортного самолета. //Известия вузов. Авиационная техника. 1999. №2. – С. 3–5.
13. Михайлов Ю.С. Расчетное исследование взлетно-посадочной механизации на крыловых профилях. /ЦАГИ, вып. 1695, 1975. –С. 29–46.
14. Степанов Ю.Г. Приближенный метод расчета оптимального расположения элементов многоцелевой механизации на крыльевом профиле. //ЦАГИ, вып. 1695, 1975. – С. 3–25.
15. Золотько Е.М., Михеев В.Я., Набатов Л.Н., Ромашкин И.К. Исследования по повышению эффективности системы обдува на крупномасштабной модели самолета с работающими двигателями //Труды ЦАГИ. – Вып. 2431. – 1989. – 32 с.
16. Краснов Н.Ф. Основы аэродинамического расчета. – М.: Высшая школа, 1981. – 496 с.

17. Николаев Л.Ф. Аэродинамика и динамика полета транспортных самолетов. М.: Транспорт, 1990. – 392 с.
18. Смирнов А.В. К вопросу о положении винта над стреловидным крылом в трансзвуковом потоке. //Труды ЦАГИ, вып. 2534, 1994. – С. 35–43.
19. Ивантеева Л.Г., Морозова Е.К., Павловец Г.А. Расчет подъемной силы тонкого профиля с закрылком при обдуве струей. // Труды ЦАГИ № 2097, 1981. – С. 7–26.
20. Золотко Е.М. Подъемная сила крыла, обдуваемого струей от винтов, при изменении коэффициента нагрузки на ометаемую винтом площадь от 0 до  $\infty$ . //Труды ЦАГИ, вып. 2235, 1984. – С. 3–10.
21. Беляков В.С., Полев А.С. Влияние управления выходным устройством на эффективную тягу силовой установки // Научно-методические материалы по процессам и характеристикам авиационных двигателей. – М: ВВИА им. Н.Е. Жуковского. – 1989. – С. 162 – 170.
22. Проблемы компоновки реактивных сопел на современных сверхзвуковых самолетах. Ч.1. Аэродинамика реактивных сопел ВРД. //Обзоры ЦАГИ №533 (по матер. иностр. печати), 1978. – 114 с.
23. Проблемы компоновки реактивных сопел на современных сверхзвуковых самолетах. Ч.3. Сопла ВРД в компоновке с хвостовыми частями самолетов. //Обзоры ЦАГИ №546, 1979. – 185 с.
24. Интерференция струй реактивных двигателей с элементами ЛА. /По матер. иностр. печати за 1971–1978 гг. – М.: Обзоры ЦАГИ №570, 1980. – 165 с.
25. Ененков В.Г., Клячкин А.Л., Коротков В.С., Супрун В.М. Авиационные эжекторные усилители тяги. /Под ред. А.Л. Клячкина. – М.: Машиностроение, 1980. – 135 с.
26. Павленко В.Ф. Силовые установки с поворотом вектора тяги в полете. М.: Машиностроение, 1987. – 196 с.
27. Самойлова Н.В. Расчет дозвукового эжекторного увеличителя тяги. //Труды ЦАГИ, вып. 2150, 1982. – С. 3–18.
28. Лисейцев Н.К., Арджоманди М. Влияние поворота вектора тяги двигателей на длину взлетной дистанции транспортного самолета. //Известия вузов. Авиационная техника. 1999. №2. – С. 3–5.
29. Петров В.К., Усков А.С. Экспериментальное исследование внешнего сопротивления гондолы ТРДД с большой степенью двухконтурности. //Труды ЦАГИ, вып. 2175, 1983. – С. 10–19.

Bibliography (transliterated)

1. Perspektivi rozvitku viyskovo-transportnoyi aviatsiyi. Viysko Ukrayini. – # 7–8. – 2001. – p. 35–37.
2. Harchenko O.V. Tendentsiyi rozvitku viyskovoyi aviatsiyi na pochatku ННІ st. Nauka i oborona. – 2003. – #3. – p. 37–45.
3. Kyuheman D. Aerodinamicheskoe proektirovanie samoletov. – М.: Mashinostroenie. 1983. – 656 p.
4. Zolotko E.M. Pod'emnaya sila kryyla, obduvaemogo struey ot vintov, pri izmenenii koeffitsienta nagruzki na ometaemuyu vintom ploschad ot 0 do  $\infty$  Trudyi TsAGI, vyip. 2235, 1984. – p. 3–10.
5. Aviatsionnyie dvigateli Pod red. I.G. Shustova. М.: ООО ID “Aerosfera”. 2007. – 328 p.

6. Ukrainets E.A., Loginov V.V. Raschetnoe issledovanie aerodinamicheskikh harakteristik vozdushnogo vinta AV-140 Zbirnik naukovih prats HUPS, #2(8). – 2006. – p. 10–13.
7. Pavlovets G.A., Ivanteeva L.G. Raschet aerodinamicheskikh harakteristik profilya pri dopolnitelnom obduve struey szhimaemogo gaza. Trudy TsAGI, vyip. 2235, 1984. – p. 32–45.
8. Ivanteeva L.G., Morozova E.K., Pavlovets G.A. Raschet pod'emnoy silyi tonkogo profilya s zakryikom pri obduve struey. Trudy TsAGI # 2097, 1981. – p. 7–26.
9. Sokov V.N. Raschet i vosproizvedenie na stende letnogo nagruzheniya vozdushnogo vinta ot kosoy obduvki. Trudy TsAGI # 2142, 1982. – 35 p.
10. Smirnov A.V. K voprosu o polozhenii vinta nad strelovidnyim kryilom v transzvukovom potoke. Trudy TsAGI, vyip. 2534, 1994. – p. 35–43.
11. Zolotko E.M. Priblizhennyiy raschet dopolnitelnoy pod'emnoy silyi pri obduvke kryila struey ot vintov. Trudy TsAGI, vyip. 1452, 1973. – p. 12–26.
12. Liseytssev N.K., Ardzhomandi M. Vliyanie povorota vektora tyagi dvigateley na dlinu vzletnoy distantsii transportnogo samoleta. Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tehnika. 1999. #2. – p. 3–5.
13. Mihaylov Yu.S. Raschetnoe issledovanie vzletno-posadochnoy mehanizatsii na kryilovyih profilyah. TsAGI, vyip. 1695, 1975. –p. 29–46.
14. Stepanov Yu.G. Priblizhennyiy metod rascheta optimalnogo raspolozheniya elementov mnogoschelevoiy mehanizatsii na kryilevom profile. //TsAGI, vyip. 1695, 1975. – p. 3–25.
15. Zolotko E.M., Miheev V.Ya., Nabatov L.N., Romashkin I.K. Issledovaniya po povyisheniyu effektivnosti sistemyi obduva na krupnomasshtabnoy modeli samoleta s rabotayuschimi dvigatelyami Trudy TsAGI. – Vyip. 2431. – 1989. – 32 p.
16. Krasnov N.F. Osnovy aerodinamicheskogo rascheta. – M.: Vysshaya shkola, 1981. – 496 p.
17. Nikolaev L.F. Aerodinamika i dinamika poleta transportnyih samoletov. M.: Transport, 1990. – 392 p.
18. Smirnov A.V. K voprosu o polozhenii vinta nad strelovidnyim kryilom v transzvukovom potoke. Trudy TsAGI, vyip. 2534, 1994. – p. 35–43.
19. Ivanteeva L.G., Morozova E.K., Pavlovets G.A. Raschet pod'emnoy silyi tonkogo profilya s zakryikom pri obduve struey. Trudy TsAGI # 2097, 1981. – p. 7–26.
20. Zolotko E.M. Pod'emnaya sila kryila, obduvaemogo struey ot vintov, pri izmenenii koeffitsienta nagruzki na ometaemuyu vintom ploshad ot 0 do  $\infty$  Trudy TsAGI, vyip. 2235, 1984. – p. 3–10.
21. Belyakov V.S., Polev A.S. Vliyanie upravleniya vyihodnyim ustroystvom na effektivnuyu tyagu silovoy ustanovki Nauchno-metodicheskie materialyi po protsessam i harakteristikam aviatsionnyih dvigateley. – M: VVIA im. N.E. Zhukovskogo. – 1989. – p. 162 – 170.
22. Problemyi komponovki reaktivnyih sopl na sovremennyih sverhsvukovyih samoletah. Ch.1. Aerodinamika reaktivnyih sopl VRD. Obzoryi TsAGI #533 (po mater. inostr. pečati), 1978. – 114 p.
23. Problemyi komponovki reaktivnyih sopl na sovremennyih sverhsvukovyih samoletah. Ch.3. Sopl VRD v komponovke s hvostovymi chastyami samoletov. Obzoryi TsAGI #546, 1979. – 185 p.
24. Interferentsiya struy reaktivnyih dvigateley s elementami LA. Po mater. inostr. pečati za 1971–1978 gg. – M.: Obzoryi TsAGI #570, 1980. – 165 p.

25. Enenkov V.G., Klyachkin A.L., Korotkov V.S., Suprun V.M. Aviatsionnyie ezhektornyye usiliteli tyagi. Pod red. A.L. Klyachkina. – M.: Mashinostroenie, 1980. –135 p.

26. Pavlenko V.F. Silovyye ustanovki s povorotom vektora tyagi v polete. M.: Mashinostroenie, 1987. – 196 p.

27. Samoylova N.V. Raschet dozvukovogo ezhektornogo uvelichatelya tyagi. /Trudy TsAGI, vyip. 2150, 1982. – p. 3–18.

28. Liseytshev N.K., Ardzhomandi M. Vliyanie povorota vektora tyagi dvigateley na dlinu vzletnoy distantsii transportnogo samoleta. Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tehnika. 1999. #2. – p. 3–5.

29. Petrov V.K., Uskov A.S. Eksperimentalnoe issledovanie vneshnego soprotivleniya gondoly TRDD s bolshoy stepenyu dvuhkonturnosti. Trudy TsAGI, vyip. 2175, 1983. – p. 10–19.

УДК 621.45.02.024:05.054

Аніпко О.Б., Логінов В.В.

### **АНАЛІЗ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В ОБЛАСТІ ЗРІЗУ ВИХІДНОГО ПРИСТРОЮ ДВИГУНА, РОЗТАШОВАНОГО ПІД КРИЛОМ ЛІТАКА**

В статті приведені результати дослідження течії гарячого і холодного потоків в області зрізу сопла авіаційного двигуна. Показана зміна параметрів газового потоку у вигляді статичного тиску і температури, чисел Маха. Для покращення робочого процесу в області установки вихідного пристрою двигуна запропоновано новий змішувально-вихідний пристрій, який дозволяє зменшити аеродинамічний опір на крейсерському режимі польоту літака.

УДК 678.073.002.68

Бухкало С.И., Ольховская О.И., Борхович А.А.

### ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Вопросы ресурсо- и энергосбережения, непрерывный рост потребления полимерных материалов и их отходов вынуждают нас все больше внимания уделять прогнозированию качества получаемых вторичных полимеров. Это связано, прежде всего, с тем, что даже в странах Евросоюза в способах утилизации полимерных отходов преобладает сжигание (рис. 1).

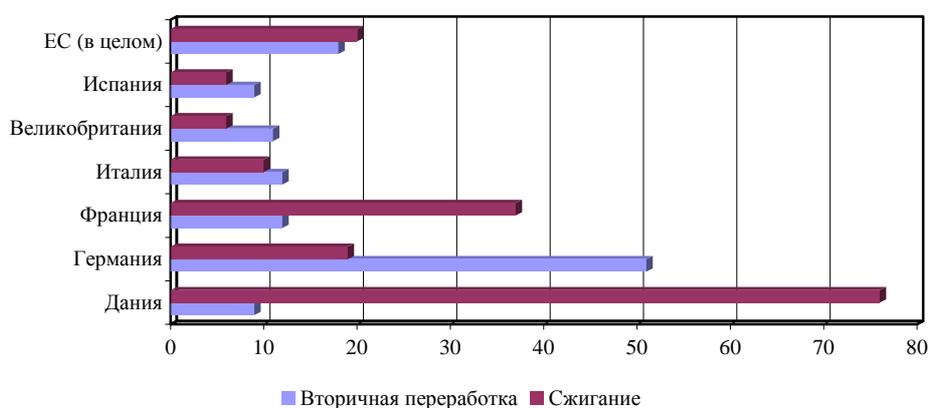


Рисунок 1 – Уровень переработки полимерных отходов в некоторых странах Европы, %

Качество изделий из вторичных полимеров может быть оценено по изменению физико-химических и физико-механических свойств, молекулярной массе полимера и целому ряду других свойств. Понятие качество для данного случая можно сформулировать следующим образом: определенная совокупность свойств продукции, потенциально или реально способных в той или иной мере удовлетворять требуемым потребностям при ее использовании по назначению, включая утилизацию или уничтожение. Техническая составляющая понятия качества обусловлена количественными и качественными изменениями объекта исследования. Объектом исследования становятся технические закономерности в формировании и проявлении физико-химических, физико-механических и других свойств предметов одинакового назначения. С точки зрения инженера-технолога, качество исследуется в сопоставлении совокупности свойств выбранного объекта с аналогичным объектом, принятым в зависимости от цели исследования за некий эталон. С экономической точки зрения, важно знать, насколько качество соответствует потребности, т.е. не всякое качество является положительным, следовательно, между техническим и экономическим пониманием качества есть определенное противоречие.

Как было показано ранее [1, 2], повышенная химическая активность вторичного полиэтилена, эксплуатировавшегося более трех месяцев и содержащего значительное количество кислородсодержащих и ненасыщенных групп, может быть положительным качеством для осуществления химических методов модификации – перекисная сшивка и химическое вспенивание. В качестве модификаторов представляют интерес перекис-

ные соединения с целью получения пространственно сшитого материала, что позволяет устранить отрицательный эффект существования локально сшитых областей, образовавшихся в процессе эксплуатации.

Увеличения скорости и эффективности процесса перекисной модификации вторичного полиэтилена достигают введением непредельных соединений [3]. Наличие в изношенном полиэтилене аналогичных активных групп (табл. 1) позволяет использовать перекисную модификацию такого вида сырья без введения дополнительных непредельных соединений.

Учитывая сравнительно высокую химическую активность вторичного полиэтилена, в процессе введения перекиси можно ожидать интенсивное протекание процессов сшивки и термоокислительной деструкции. Для вторичного полиэтилена в процессе его переработки литьем под давлением характерным является изменение текучести расплава. В отличие от экструзии, процессы переработки литья под давлением характеризуются более высокими скоростями сдвига и сдвиговыми напряжениями [4], что является одной из причин увеличения показателя текучести расплава материала.

Для совершенствования разработанной технологии вспенивания вторичного полиэтилена и повышения качества изделий из него необходимо исследовать влияние основных технологических параметров на процесс вспенивания.

Таблица 1 – Изменение количества ненасыщенных групп

Время эксплуатации в весенне-летний период, сут	Содержание ненасыщенных групп на 100 атомов, углерода				
	Винильная	Винилиденовая	Трансвиниленовая	Сумма	Метильная
0	0,0142	0,0974	0,0113	0,1230	5,672
30	0,0192	0,0620	0,0125	0,0940	5,091
62	0,0583	0,0558	0,0290	0,1430	4,521
128	0,1385	0,0400	0,0300	0,2085	3,698

Увеличение концентрации перекиси, уменьшение температуры литья и длительности охлаждения создают предпосылки для увеличения в композиции сшитой части, что приводит к смещению температуры текучести и размягчения в область более высоких температур. Это подтверждается ростом содержания гельфракции и меньшей склонностью материала к деструкции в этих условиях переработки.

У модифицированного перекисью материала, как показали дериватографические исследования, значительно повышается температура разложения и уменьшается максимальная скорость разложения. Это связано, вероятно, с процессами вторичной сшивки. Введение перекиси дикумила не способствует дальнейшему окислению материала, так как область окисления исходного и модифицированного полиэтилена находится в одних и тех же температурных пределах, а термоустойчивость повышается.

Для проведенного процесса модификации вторичного полиэтилена была разработана математическая модель с целью изучения влияния технологических параметров и концентрации перекиси дикумила на прочность литьевых образцов и содержание гельфракции. Для решения поставленной задачи был использован метод многофакторного эксперимента [5], позволяющий с минимальными затратами сырья и времени по-

лучить достоверную информацию, необходимую для оптимизации процесса модификации. В связи с тем, что конечной целью является качество получаемых изделий, в качестве переменной состояния были выбраны прочность при растяжении  $Y_1$  и содержание гельфракции  $Y_2$ .

В число влияющих факторов были включены температура литья  $T(X_1)$ , длительность цикла литья  $\tau(X_2)$  и концентрация перекиси дикумила  $C(X_3)$ . Из результатов предыдущих экспериментов следует, что модификацию вторичного полиэтилена перекисью дикумила в процессе литья под давлением необходимо проводить в температурном интервале  $170^{\circ}\text{--}210^{\circ}\text{C}$  в течение  $65\text{--}85$  с и при концентрации перекиси дикумила  $0,1\text{--}0,4\%$ . Исследования выявили, что вышеуказанные факторы оказывают незначительное влияние на прочность при растяжении образцов модифицированного материала  $Y_1$ . Вероятно, при введении перекиси дикумила снижается влияние температуры на прочность отлитых образцов в данном интервале варьирования факторов. Поэтому в дальнейшем в качестве переменной состояния было выбрано содержание гельфракции  $Y_2$ .

Учитывая небольшое количество факторов ( $K = 3$ ) было принято решение реализовать полный факторный эксперимент с изменением факторов на двух уровнях. Для реализации опытов по избранному плану было проведено определение интервалов варьирования и кодирование (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты варьирования переменных

Влияющий фактор	Условное обозначение	Диапазон изменения	Нулевой уровень	Интервал варьирования
$T^{\circ}\text{C}$	$X_1$	$170 - 210$	$X_{10} = \frac{170+210}{2} = 190$	$\Delta X_1 = \frac{210-170}{2} = 20$
$\tau$ (с)	$X_2$	$65 - 85$	$X_{20} = \frac{65+85}{2} = 75$	$\Delta X_2 = \frac{85-65}{2} = 10$
$C$ (%)	$X_3$	$0,1 - 1,4$	$X_{30} = \frac{0,1+0,4}{2} = 0,25$	$\Delta X_3 = \frac{0,4-0,1}{2} = 0,15$

Последующая обработка опытных данных с целью получения уравнения регрессии, адекватно описывающего исследуемый процесс, произведена на ЭВМ.

В результате получено уравнение регрессии, адекватно описывающее процесс:

$$Y = 49,65 - 4,32X_1 - 4,48X_2 + 1,99X_3 - 3,41X_1X_2$$

Знаки при членах уравнения соответствуют установившимся представлениям о роли основных факторов при модификации, а абсолютные значения коэффициентов регрессии указывают на вклад каждого из членов в формирование величины переменной состояния  $Y$ .

Проведенные эксперименты и выведенное уравнение регрессии для процесса модификации вторичного полиэтилена перекисью дикумила при литье под давлением указывает на его большую чувствительность к длительности цикла литья, температурному воздействию и в меньшей степени, для данных концентраций перекиси, количеству перекиси.

Формально задача оптимизации условий ведения процесса сводится к определению координат локальной области факторного пространства с наибольшим значением

переменной состояния  $Y$ . При решении задачи был использован метод крутого восхождения Бокса-Уилсона, заключающийся в шаговом движении в направлении скорейшего возрастания критерия оптимизации, которым в рассматриваемом случае является содержание гельфракции.

Поиск оптимума производился с помощью ЭВМ в различных областях факторного пространства. Численное значение переменной состояния имеет максимальное значение при комбинациях влияющих факторов  $X_1 = -1$ ,  $X_2 = -1$ ,  $X_3 = 1$ . В отмеченных точках оптимума происходит следующее. Максимальное содержание гельфракции для процесса модификации вторичного полиэтилена перекисью дикумила можно получить исходя из вышеприведенного уравнения регрессии при переработке его при минимальных температуре и длительности цикла литья и максимальной концентрации перекиси дикумила.

Для удобства практического использования полученной зависимости с помощью формулы кодирования путем обратного перехода к натуральным переменным получаем следующее уравнение:

$$Y = -122,0425 + 1,0627T + 2,7915 \tau + 13,267 C - 0,017T \cdot \tau.$$

Для проведенного процесса вспенивания вторичного полиэтилена была разработана математическая модель с целью изучения влияния технологических параметров и концентрации компонентов активирующего комплекса на плотность получаемых изделий ( $Y$ ). Для решения поставленной задачи был использован метод многофакторного эксперимента. В число влияющих факторов были включены и концентрация вспенивающего комплекса  $C(X_1)$ , температура вспенивания  $T(X_2)$ , длительность вспенивания  $\tau(X_3)$ .

Таблица 3 – Результаты варьирования переменных

Влияющий фактор	Условное обозначение	Диапазон изменения	Нулевой уровень	Интервал варьирования
$C$ (%)	$X_1$	2 – 4	$X_{10} = \frac{2 + 4}{2} = 3$	$\Delta X_1 = \frac{4 - 2}{2} = 1$
$T$ °C	$X_2$	180 – 160	$X_{20} = \frac{180 + 160}{2} = 170$	$\Delta X_2 = \frac{180 - 160}{2} = 10$
$\tau$ (с)	$X_3$	10 – 20	$X_{30} = \frac{10 + 20}{2} = 15$	$\Delta X_3 = \frac{20 - 10}{2} = 5$

Последующая обработка опытных данных с целью получения уравнения регрессии, адекватно описывающего исследуемый процесс, произведена на ЭВМ. В результате получено уравнение регрессии, адекватно описывающее процесс:

$$Y = 0,283 - 0,083X_1 - 0,125X_2 - 0,131X_3 + 0,050X_1X_2 + 0,074X_1X_2X_3.$$

Знаки при членах уравнения соответствуют установившимся представлениям о роли основных факторов при вспенивании, а абсолютные значения коэффициентов регрессии указывают на вклад каждого из членов в формирование величины переменной состояния  $Y$ . Для получения вспененного полиэтилена в виде плит и блоков пока-

зана возможность применения химического вспенивания при прессовании. Следует отметить, что полученное уравнение регрессии действительно только в исследованной области температур при количестве активирующего комплекса в пределах  $3 \pm 1$  мг на 100 мг вторичного полиэтилена.

Полученные данные позволяют предположить, что не содержание гельфракции, а степень окисления является критерием оценки пригодности вторичного полиэтилена для получения пенопласта.

Таким образом, полученные данные в результате применения полного факторного эксперимента хорошо согласуются с физической сущностью процесса модификации вторичного полиэтилена перекисью дикумила при литье под давлением или методом химического вспенивания. Поэтому уравнение регрессии может быть использовано в производственной и расчетной практике.

#### Литература

1. Бухкало С.И. Ресурсосберегающие технологии использования полимерных отходов // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», № 2, 2001. – с. 106.
2. Бухкало С.И. Математическая модель процесса модификации вторичного полиэтилена // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», № 4, 2003. – с. 16.
3. Романова Л.В., Донцов А.А., Кочнов И.М., Канаурова А.А. Сшивание полиэтилена в присутствии неопределенных низкомолекулярных соединений. Пластические массы. – М., № 1, 1975. – с. 49.
4. Бухкало С.И., Левин В.С., Ушакова О.Б. Особенности строения и модифицирование вторичного полиэтилена. Пластические массы. – М., № 10, 1989. – с. 58.
5. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Статистические методы планирования и обработки экспериментов. – М.: Изд. МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1992. – 152 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Buhkalo S.I. Resursosberegayuschie tehnologii ispolzovaniya polimernyih othodov Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «HPI», # 2, 2001. – p. 106.
2. Buhkalo S.I. Matematicheskaya model protsessa modifikatsii vtorichnogo polietilena Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «HPI», # 4, 2003. – p. 16.
3. Romanova L.V., Dontsov A.A., Kochnov I.M., Kanaurova A.A. Sshivanie polietilena v prisutstvii nepredelnyih nizkomolekulyarnyih soedineniy. Plasticheskie massyi. – M., # 1, 1975. – p. 49.
4. Buhkalo S.I., Levin V.S., Ushakova O.B. Osobennosti stroeniya i modifitsirovanie vtorichnogo polietilena. Plasticheskie massyi. – M., # 10, 1989. – p. 58.
5. Ahnazarova S.L., Kafarov V.V. Statisticheskie metody planirovaniya i obrabotki eksperimentov. – M.: Izd. MHTI im. D.I. Mendeleeva, 1992. – 152 p.

УДК 678.073.002.68

Бухкало С.І., Ольховська О.І., Борхович А.А.

**ОЦІНКА ЯКОСТІ ВТОРИННИХ ПОЛІМЕРІВ  
ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ**

У роботі наведені основні зміни властивостей у процесі експлуатації поліетилену, що дозволяє вибрати методи оцінки якості вторинних полімерів, які отримують після направленої модифікації.

Запропонована розробка математичних моделей модифікації вторинного поліетилену пероксидом дикумила та методом хімічного спінювання з метою вивчення впливу технологічних параметрів і концентрації пероксиду дикумила та активуючого комплексу на міцність і якість виробів, а також їх властивості.

Качан Ю.Г., Баташова Н.А.

**О РЕЗУЛЬТАТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ  
ПО ЭКОНОМИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ**

Достоинством комбинированных систем отопления является возможность получения тепловой энергии путем использования различных видов энергоресурсов. Приведенная в [1] система с мини-котлом(ами), тэном(ами) и электрическим теплоаккумулирующим преобразователем(ями) (ЭТАПом) [2] обладает указанным преимуществом, т.к. потребляет и электрическую энергию, и газ. Еще одним существенным ее достоинством является возможность применения электроэнергии по внепиковому тарифу, причем не только во время его действия, а и после, что становится возможным благодаря наличию ЭТАПа. В результате можно обеспечить покрытие тепловой нагрузки с минимальными затратами при действующих тарифах на энергоресурсы и ценах на используемое энергетическое оборудование.

Увеличения эффективности систем отопления можно добиться и за счет снижения тепловой нагрузки, утепляя ограждающие конструкции здания. При этом подбирая, например, изоляционные материалы, их толщины, тип и размеры стеклопакетов необходимо учитывать их стоимость, минимизируя капитальные и суммарные затраты отопительного сезона в целом.

Таким образом, решением задачи оптимизации параметров комбинированной системы отопления является подбор состава и мощностей энергетического оборудования, изоляционных материалов ограждающих конструкций, их толщин, а также типов окон (по коэффициенту теплопередачи). Все эти параметры выбираются в зависимости от цен на оборудование, изоляционные материалы, стеклопакеты, а также тарифов на энергоресурсы.

Алгоритм оптимизации параметров комбинированной системы отопления [3] можно использовать для:

- прогнозирования затрат отопительного сезона, учитывая реальные параметры здания и системы отопления при условии нулевых капитальных вложений;
- оценки эффективности вариантов реконструкции существующих систем отопления и здания;
- определения оптимальных параметров вновь проектируемых здания и системы отопления с точки зрения минимизации затрат отопительного сезона.

Использование алгоритма по двум первым вариантам, по сути, является инструментом энергоменеджмента и позволяет оценить эффективность использования энергоресурсов и выбрать наиболее рациональный вариант реконструкции системы. В последнем применении алгоритм является инструментом проектирования систем отопления.

Прокомментируем указанные варианты использования разработанного алгоритма путем его машинной реализации на примере здания Запорожского областного центра занятости, имеющего следующие параметры: общий строительный объем – 13722,55 м<sup>3</sup>; ширина – 12 м; длина – 60,93 м; высота – 12 м; площадь – 798,12 м<sup>2</sup>; периметр – 145,86 м; площадь ограждающих конструкций – 2508,93 м<sup>2</sup>; площадь остекления с витражами – 636 м<sup>2</sup>. Наружные стены выполнены из силикатного кирпича толщиной 510 мм (коэффициент теплопроводности 0,76 Вт/(м·К), перекрытие верхнего и нижнего

этажей – плиты железобетонные толщиной 220 мм (коэффициент теплопроводности 1,92 Вт/(м·К). Стены и чердачное перекрытие оштукатурены известково-песчаным раствором толщиной 0,01 м (коэффициент теплопроводности 0,7 Вт/(м·К).

В конструкции пола, помимо железобетонной плиты, присутствует цементно-шлаковая стяжка толщиной 0,02 м (коэффициент теплопроводности 0,52 Вт/(м·К) и линолеум толщиной 0,008 м (коэффициент теплопроводности 0,33 Вт/(м·К). Здание ориентировано на юго-восток. Вентиляция – естественная, спроектированная вентиляция не эксплуатируется. Количество работающих людей – 120 человек. Для освещения помещений используются два типа ламп (накаливания и энергосберегающие), причем суммарная мощность первых 47460 Вт с КПД 6 %, а энергосберегающих – 3960 Вт с КПД 60 %.

В здании использованы окна разных площадей. Их выбор производился по трем вариантам:

1. Существующие (двойное остекление в металлических раздельных переплетах) с коэффициентом теплопередачи 3.226 Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Их суммарная стоимость по ценам на текущий момент составляет 334057.1 грн.

2. Металлопластиковые с коэффициентом теплопередачи 2.89 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Их стоимости, с учетом установки, в зависимости от площади окон составят: 154 окна 1710×1740 мм по 1794.83 грн.; 16 окон 1080×1740 мм – 1306.31 грн.; 5 окон 5500×3000 мм. – 6920.92 грн.; 6 окон 1080×540 – 870.72 грн.; 12 окон 1600×3000 мм – 2840.05 грн. (данные ООО Гарант г. Запорожье)

3. Металлопластиковые энергосберегающие с коэффициентом теплопередачи 1.4 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Их стоимости составят: 154 окна 1710×1740 мм по 2033.54 грн.; 16 окон 1080×1740 мм – 1444.72 грн.; 5 окон 5500×3000 мм – 8403.1 грн.; 6 окон 1080×540 – 900.95 грн.; 12 окон 1600×3000 мм – 3264.77 грн.

В качестве вариантов утеплителей наружных ограждений рассмотрены три вида материалов фирмы ROCWOOL:

1. Пластер баттс (коэффициент теплопроводности 0,042 Вт/(м·К)) стоимостью 952 грн/м<sup>3</sup> с возможной толщиной 0.05 и 0.18 м.

2. Руфф баттс (коэффициент теплопроводности 0,043 Вт/(м·К)) стоимостью 1458 грн/м<sup>3</sup> с возможной толщиной 0.05 и 0.2 м.

3. Венти баттс (коэффициент теплопроводности 0,043 Вт/(м·К)) стоимостью 1502 грн/м<sup>3</sup> с возможной толщиной 0.05 и 0.18 м.

Рассматривалась трехтарифная система оплаты электроэнергии, которая, в соответствии с данными ВАТ “Запоріжжяобленерго”, сведена в таблицу 1.

Таблица 1 – Тарифная система оплаты электроэнергии по трем зонам

№	Зона тарифа	Время действия	Коэффициент
1.	Пик	с 8.00 до 11.00 с 20.00 до 22.00	1,5
2.	Полупик	с 7.00 до 8.00 с 11.00 до 20.00 с 22.00 до 23.00	1
3.	Ночь	с 23.00 до 7.00	0,4

Полупиковый тариф за 1 кВт\*ч составляет 0,28 грн.

Стоимость 1000 м<sup>3</sup> газа принята равной 1050 грн, а подпиточной воды для системы отопления – 526 грн. за 1000 м<sup>3</sup>. Объем подпиточной воды для нужд системы отопления – 0,015 м<sup>3</sup> в сутки. В настоящее время для отопления здания используется три

газовых модуля нагрева МН120 номинальной теплопроизводительностью 108 кВт с КПД 90 %. Цена одного модуля МН120 на текущий момент равна 20396 грн, секции тэнов СЕВ (ООО Жилтехснаб) мощностью 3 кВт с КПД 93 % – 120 грн.

Затраты на ЭТАП, которые в перспективе должны также выбираться по прайсам фирм-производителей или поставщиков, приняты с учетом суммы цены бака, электродов и материала наполнителя (карбид кремния). Стоимость последнего – 1000 грн./т (3215 грн./м<sup>3</sup>). Стоимости бака и электродов, в свою очередь, зависят не только от цен на использованные материалы, а и от стоимости их изготовления. На данном этапе примем: цена бака – 712 грн., электродов – 534 грн. (соответственно 8 % и 6 % от стоимости материала наполнителя для преобразователя мощностью 300 кВт).

КПД ЭТАПа в условиях практической реализации будет меняться, т.к. он зависит не только от КПД преобразования электрической энергии в тепловую (близок к 100 %), а и от используемого теплообменника и изоляции ЭТАПа в целом. В расчете он условно принят равным 89 %. Температуры плавления графита – 3500 °С, стали – 1300 °С, карбида кремния 2827 °С. Стоимость дополнительных затрат, связанных с наличием преобразователя, (наличие изоляции для последнего, а также теплообменника) принята равной 10000 грн. Количество дней отопительного сезона – 176.

Расчет произведен для отопительного сезона 2006–2007г. Данные о температуре в тени взяты из архивов Gismeteo для г. Запорожья. Обеспечиваемая температура внутри здания принята равной +20 °С, минимальная температура наружного воздуха составила – -16,9 °С.

Результаты использования алгоритма оптимизации для рассмотренных выше вариантов его применения на примере Запорожского областного центра занятости сведены в таблицу 2. Для сравнительного анализа рассчитаны также затраты отопительного сезона для рассматриваемого здания с существующими параметрами последнего и системы отопления при капитальных вложениях, определенных по ценам на текущий момент. Искомые затраты составляют 174364,9 грн., стоимость газового оборудования принята равной 61188 грн., окон – 334057,1 грн. Необходимая суммарная теплопроизводительностью модулей нагрева составила 324 кВт.

Таблица 2 – Результаты использования алгоритма оптимизации

№	Вариант использования	Капитальные вложения (КВ) в оборудование, грн.	КВ в изоляцию, грн.	КВ в окна, грн.	Затраты за отопительный сезон, грн.	Необходимые мощности оборудования, кВт
1	Прогнозирование	газовые модули нагрева – 0	0	0	60230,8	модулей нагрева – 324
2	Реконструкция	тэн –12240 ЭТАП – 18036 доп. затраты – 10000	0	0	59582,3	тэна – 306 ЭТАПа – 533
3	Проектирование	тэн –10200 ЭТАП – 15160 доп. затраты – 10000	0	422879,12	170988,2	тэна – 255 ЭТАПа – 448

Особенностью алгоритма расчета затрат отопительного сезона является то, что величины амортизационных отчислений принимаются в зависимости от предварительно заданного периода окупаемости капитальных вложений. В рассматриваемом примере последний принят равным 5 лет исходя из условий инвестиционной привлекательно-

сти проекта. С учетом приведенных особенностей разница затрат при различных вариантах параметров здания и систем отопления представляет собой чистую экономию.

Исходя из данных таблицы 2, очевидно, что экономия при реконструкции существующей системы отопления – 648,5 грн. за отопительный сезон. По истечении срока окупаемости прибыль будет составлять 8703,7 грн. в год. Снижение затрат для одного отопительного сезона при вновь проектируемых системе отопления и здании с оптимальными параметрами по сравнению с существующими составит 3376,7 грн. По истечении срока окупаемости оборудования чистая экономия составит –15975,5 грн.

В приведенном примере рассматривается один вариант реконструкции существующей системы отопления. Аналогично можно рассчитать другие и выбирать более приемлемый, например, по величине предполагаемых капиталовложений и затратам на отопительный сезон. Если разница затрат отопительного сезона для сравниваемых вариантов и существующей системы оказывается отрицательной, то при заложенных нормах амортизации вариант реконструкции либо первоначальный проект не целесообразны. В данном случае возможно путем изменения норм амортизационных отчислений увеличивать срок окупаемости до достижения положительного значения разницы затрат и только после этого принимать решение о целесообразности реконструкции (проектирования).

Таким образом при существующих ценах на оборудование, изоляционные материалы, стеклопакеты, а также тарифах на энергоносители с помощью предложенной авторами методики и алгоритма можно выбрать параметры проектируемой системы отопления, модернизировать существующую, минимизировав при этом затраты всего отопительного сезона, либо спрогнозировать последние для системы отопления любого существующего здания.

#### Литература

1. Качан Ю.Г., Баташова Н.А. Об оценке экономической эффективности комбинированной системы отопления / Энергетика: економіка, технології, екологія. – Київ: НТУУ “КПІ”, 1’2007. – с. 92–97.

2. Качан Ю.Г., Левченко С.А., Кононенко Н.А. (Баташова Н.А.). Применение электрического теплоаккумулирующего преобразователя для повышения эффективности системы горячего водоснабжения/ Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Энергоэффективность 2005», приложение к журналу «Холодильная техника и технология». – Одесса: Рефпринтінфо, 2005. – с. 90–94.

3. Качан Ю.Г., Баташова Н.А. Оптимизация параметров комбинированной системы отопления по экономическому критерию / Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 1’2008.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kachan Yu.G., Batashova N.A. Ob otsenke ekonomicheskoy effektivnosti kombinirovannoy sistemyi otopleniya Energetika: ekonomika, tehnologiyi, ekologiya. – Kiyiv: NTUU “KPI”, 1’2007. – p. 92–97.

2. Kachan Yu.G., Levchenko S.A., Kononenko N.A. (Batashova N.A.). Primenenie elektricheskogo teploakkumuliruyuschego preobrazovatelya dlya povyisheniya effektivnosti sistemyi goryachego vodosnabzheniya Sbornik nauchnyih trudov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Energoeffektivnost 2005», prilozhenie k zhurnalu «Holodilnaya tehnika i tehnologiya». – Odessa: Refprintinfo, 2005. – p. 90–94.

3. Качан Ю.Г., Баташова Н.А. Optimizatsiya parametrov kombinirovannoy sistemy otopleniya po ekonomicheskomu kriteriyu Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «НПІ», 1'2008.

УДК 697.1

Качан Ю.Г., Баташова Н.А.

**ПРО РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ  
КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ЗА ЕКОНОМІЧНИМ КРИТЕРІЄМ**

У статті розглянуті різні варіанти застосування алгоритму оптимізації параметрів комбінованої системи опалення. Вони дають можливість при існуючих цінах на устаткування, ізоляційні матеріали, склопакети, а також тарифах на енергоносії вибрати параметри системи що проектується, модернізувати існуючу, мінімізувавши при цьому витрати всього опалювального сезону, або спрогнозувати останні для системи опалення будь-якого існуючого будинку.

УДК 681.527

Галушка Ю.В., Литвин-Попович И.А., Слюсаренко Ю.А., Саенко Д.В., Клименко И.В.,  
Зимин Д.Б.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И РАЗРАБОТКА СТЕНДА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ДВИЖЕНИЕМ ТАНКА**

Динамические процессы, протекающие как внутри танка, так и при его взаимодействии с дорожным покрытием в процессе движения, достаточно сложны. Гусеничный танк представляет собой сложную электро-гидро-механическую систему, состоящую из большого количества движущихся масс и подсистем, имеющих множество степеней свободы. Для параметрического синтеза системы автоматизированного управления движением танка необходимо знать динамические характеристики его электро-гидро-механических узлов и систем.

Исследование динамических процессов, протекающих в танке непосредственно при его движении в процессе ходовых испытаний, является весьма сложной задачей, требующей значительных материальных и людских ресурсов. Известно, что даже в условиях полигона, оснащённого по последнему слову техники, не представляется возможным досконально исследовать параметры объекта управления (танка) и его системы управления во всех возможных режимах и условиях движения. Таким образом, разработка специальных технологий, позволяющих исследовать объект управления (танк) совместно с системой управления в стендовых условиях, является актуальной задачей на современном этапе развития танкостроения.

*С целью разработки специальных технологий* для создания составных частей системы управления движением танка в КП ХКБМ им. А.А. Морозова *разработан стенд для исследования гидросистемы управления движением танка.*

*Основанием для выполнения работы* является Государственная целевая программа подготовки производства и создания специальных технологий и материалов для изготовления нового и модернизации существующего вооружения и военной техники на период 2005÷2009 г.г. и постановление Кабинета Министров Украины от 12.05.2007г. №731-4.

**1. Назначение стенда.** Стенд гидросистемы управления движением танка (далее – стенд) [4] предназначен для проведения исследовательских работ по определению динамических характеристик гидрооборудования системы управления движением танка, а также для всех видов испытаний гидроузлов системы управления. В том числе для испытания и исследования динамических характеристик механизмов управления (МУпр. и МУлев.) бортовыми коробками передач (БКП), клапанного устройства, фильтров, электрогидроклапанов [3]. Стенд при различных значениях температуры рабочей жидкости (масла) обеспечивает в реальном масштабе времени с помощью вычислительных средств регистрацию и аналитическую обработку контролируемых параметров, таких как давление и расход масла в имитаторах бустеров (ИБ1...ИБ12) БКП при имитации с помощью механизмов управления БКП режимов переключения передач, поворота, выключения передач и переключения реверса, а также контроль давления и расхода масла при проверке электрогидроклапанов [2], клапанного устройства, фильтров и сервомеханизма привода тормоза.

**2. В состав стенда** входят: две насосные установки малой и большой производительности, гидравлический бак, рабочий стол, имитаторы бортовых коробок передач, гидравлическая система, комплект соединителей, платформа для крепления гидроузлов и измерительный комплекс.

**3. Устройство стенда и его составных частей.** Схема размещения гидрооборудования стенда приведена на рис. 8. Две насосные установки обеспечивают подачу масла к испытуемым/исследуемым гидроузлам и позволяют получить три уровня подачи масла: 27 л/мин, 86,4 л/мин и 113,4 л/мин при давлении 2МПа. Гидравлический бак для сбора и хранения масла имеет термоизоляцию на наружной стороне, систему регулирования температуры масла и датчик минимального уровня масла. На рабочем столе размещены:

- плиты, обеспечивающие установку правого и левого механизмов управления на имитаторах бортовых коробках передач танка (ИКПлев, ИКПправ);
- плита для проведения входного контроля электрогидроклапанов;
- кронштейны для крепления испытуемых фильтров;
- плита для установки испытуемого клапанного устройства;
- приводы управления [1] механизмами управления;
- панель измерительных приборов см. рис. 1.

Приводы управления по принципу действия являются рычажно-механогидравлическими и предназначены для управления механизмами управления при проведении исследовательских работ и приёмо-сдаточных испытаний. Приводы управления обеспечивают выключение сцепления, включение требуемой передачи, поворот и переключение реверса. На приводах управления установлены потенциометрические датчики положения. Гидравлическая система рис. 1...рис. 7 обеспечивает подвод рабочей жидкости (масла) к исследуемым/испытуемым на стенде гидроагрегатам и имеет места для установки датчиков с целью контроля и записи параметров гидравлического оборудования. Комплект соединителей и измерительной аппаратуры предназначен для обеспечения проведения испытаний и исследований путём установки рукавов, соединителей, расходомеров, датчиков давления и температуры.

**4. Работа стенда гидросистемы.** Из масляного бака (Б) (см. схему гидравлическую принципиальную рис. 1...рис. 7) масло насосами Н1 и Н2 через фильтр Ф2 подаётся к клапанному устройству КУ, которое обеспечивает поддержание заданного давления в гидросистеме. Далее поток масла разделяется на два потока: один через фильтр тонкой очистки (Ф3) подаётся в точку «Д», второй без дополнительной очистки подаётся в точки «Г» и «Е». Слив масла из исследуемого/испытуемого гидрооборудования производится в масляный бак. При проведении испытаний механизмов управления последние устанавливаются на плиты рабочего стола и подключаются к гидросистеме стенда в соответствии с рис. 1. Подвод масла к производится от точек «Г» и «Е» рукавами РВД1, РВД2 и РВД3. Подключение фильтров грубой и тонкой очистки производится в соответствии с рис. 2. и рис. 3. При этом используются по два датчика давления, устанавливаемые в точки ТКД16, ТКД17 и ТКД18, ТКД19 соответственно. Для регулировки расхода масла используется регулятор потока (РП), устанавливаемый на стенд на время испытаний. Подключение сервомеханизма привода тормоза производятся в соответствии с рис. 4. Подключение электрогидроклапанов типа MHDRE и FTDRE при входном контроле производится в соответствии с рис. 5. и рис. 6. Подключение клапанного устройства (КУ) производится в соответствии с рис. 7. При испытаниях используется датчик давления, устанавливаемый в точку ТКД22, расходомер РА4, устанавливаемый в точку ТКР3, и вентиль (В). Блок измерительных преобразователей

совместно с платами сбора данных измерительного комплекса стенда обеспечивает преобразование измеряемых физических величин в электрические сигналы. Технические характеристики блока измерительных преобразователей приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование измерительного преобразователя-датчика и их количество	Диапазон измерения физического параметра	Класс точности или погрешность	Выходной сигнал датчика	Частота опроса [Гц]	Диапазон рабочих температур [°С]
1	Давление (8 шт.)	0÷25 [бар]	0,5	0÷10 [В]	100	5÷120°С
2	Расход (7 шт.) (Pmax ≤ 25 [бар])	18÷150 и 0÷36 [л/мин]	1 0,5	0÷10 [В]	2	5÷120
3	Угловое перемещение (3 шт.)	0÷355 [°]	±0,5[%]	0÷4,7 [кОм]	100	5÷120
4	Температура (2 шт.)	0÷150 [°С]	±1[°С]	0÷20 [mA]	1	5÷120
5	Ток (7 шт.)	0÷1 [А]	±0,1[%]	0÷1 [В]	1000	5÷120
6	Напряжение (7 шт.)	0÷30 [В]	±0,1[%]	0÷10 [В]	1000	5÷120

Платы сбора данных выполнены в виде внешнего USB модуля с 32 цифровыми и 16 аналоговыми каналами, разрядностью 14 бит и максимальной частотой преобразования не менее 100 кГц. Функциональное программное обеспечение (ФПО) измерительного комплекса стенда обеспечивает выполнение следующих функций:

- управления платами сбора данных в процессе проведения испытаний в реальном масштабе времени с одновременным преобразованием сигналов с датчиков в числовые значения в десятичной системе исчисления с последующей их записью на жесткий диск персонального компьютера (ПК) в виде двухмерного числового массива данных. Тип и количество одновременно подключаемых к измерительному комплексу датчиков задаётся оператором с помощью меню и в общем случае может быть меньше общего количества точек измерения;

- динамическое формирование массива данных в зависимости от длительности цикла испытаний. Количество столбцов массива данных соответствует максимальному числу измеряемых параметров плюс один – текущее время. Количество строк массива данных соответствует количеству тактов измерений в пределах длительности цикла испытаний. Массив данных записывается на жёсткий диск ПК;

- по окончании цикла записи имя файла данных содержит дату, время и вид испытаний, а так же имя оператора, проводившего испытания;

- визуальная часть ФПО выполнена в виде главного меню с раскрывающимися подпунктами;

- ФПО обеспечивает вывод визуальной и звуковой сигнализации по заданным оператором граничным условиям, а так же обеспечивает проведение метрологической аттестации измерительного комплекса стенда.

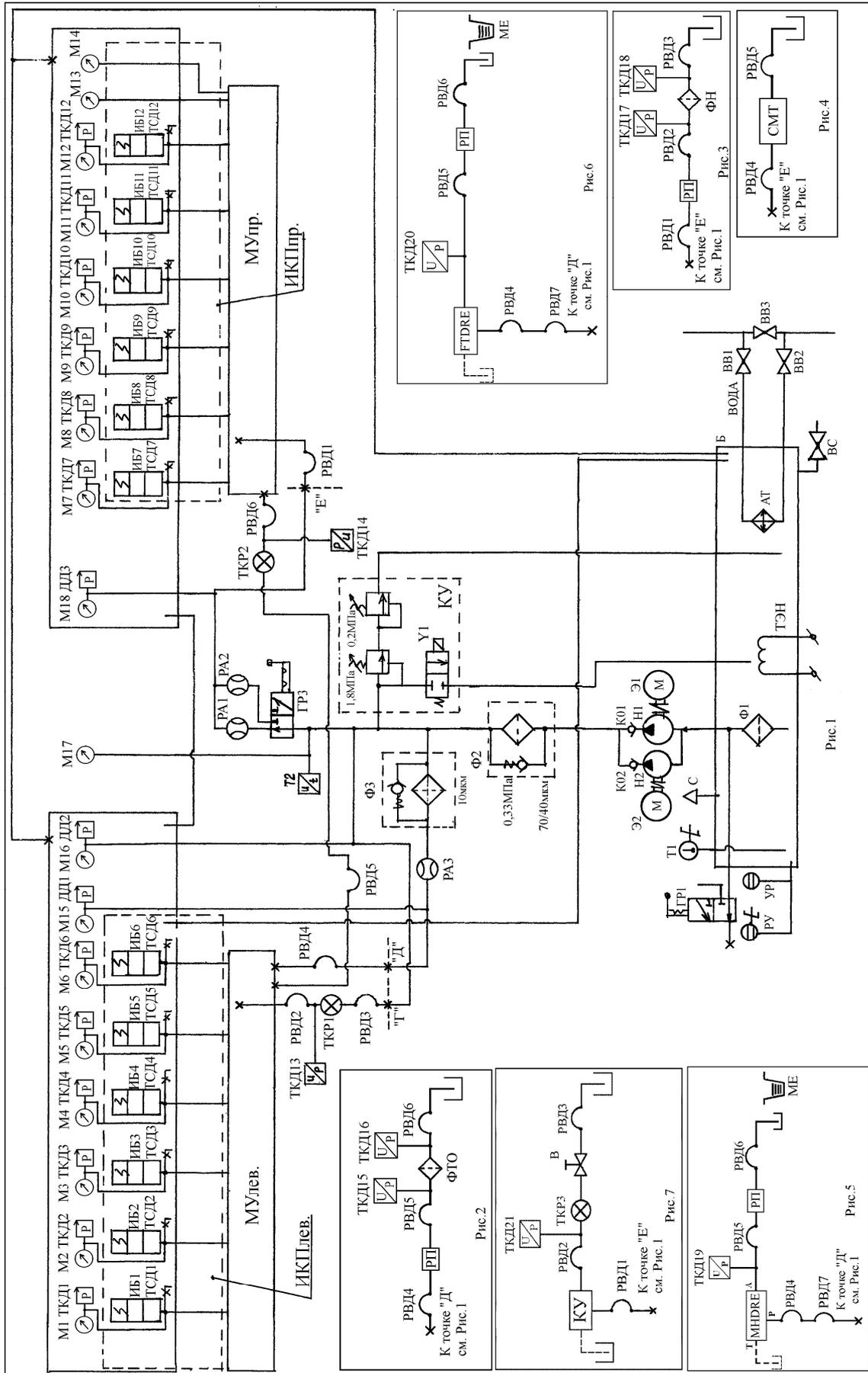


Рисунок 1, ..., Рисунок 7 – Гидравлическая схема стэнда гидросистемы управления движением танка

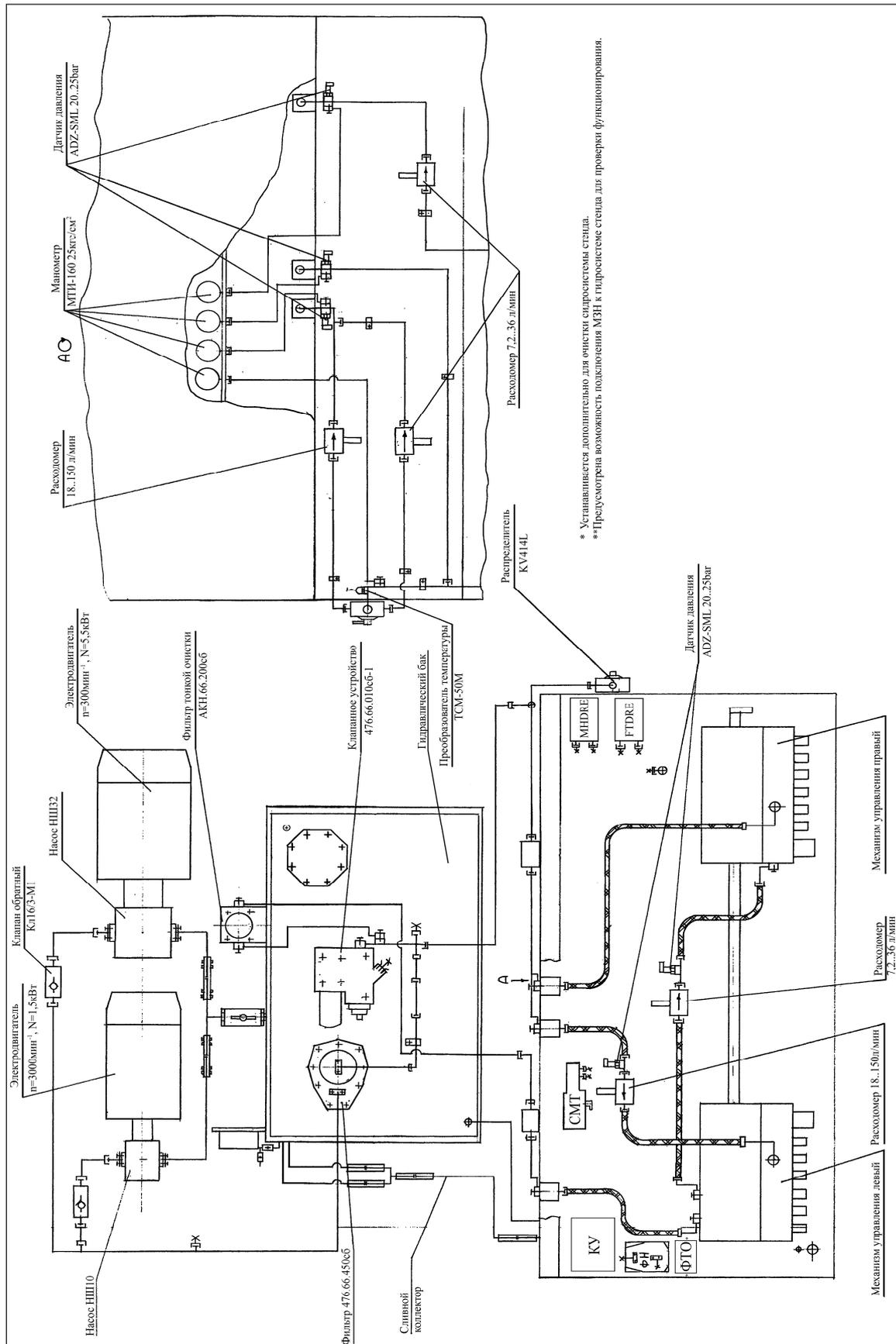


Рисунок 8 – Схема размещения гидрооборудования станда гидросистемы управления движением танка

С помощью пунктов меню оператор станда имеет возможность: выбора типа и количества параметров из общего списка для проведения конкретного вида измерений перед началом цикла испытаний; включения режимов записи на жёсткий диск и отображения на экране монитора ПК измеряемых параметров в любой момент времени; выбора режима отображения измеряемых параметров и их количества на экране монитора ПК в виде разноцветных графиков, сгруппированных по типу и/или в виде индикаторов (стрелочных или цифровых указателей) в процессе проведения испытаний в реальном масштабе времени; отдельной настройки и калибровки каждого измерительного канала перед началом испытаний, а так же сохранения настройки измерительных каналов для проведения повторных или аналогичных видов испытаний; вывода на экран монитора компьютера или на печатающее устройство любого количества, либо всего списка, измеряемых параметров на интервале времени измерения заданной длительности в виде таблиц и/или графиков по окончании цикла измерений для формирования отчетных документов.

### **5. Выводы**

В условиях ограниченного финансирования оборонной промышленности в настоящее время разработка и производство новых военных гусеничных машин (ВГМ), в том числе танков, осуществляется, как правило, единичными или мелкосерийными партиями. Разработанный в КП ХКБМ, многофункциональный стенд для исследования гидросистемы управления движением танка, оснащённый контрольно измерительным комплексом, построенным на базе вычислительных средств, позволит существенно экономить материальные ресурсы в процессе разработки, испытаний и внедрения в производство новых систем управления движением ВГМ. При проведении испытаний гидроузлов системы управления движением танка две насосные станции станда позволяют получить три уровня подачи масла при давлении 2МПа: 27 л/мин, 86,4 л/мин и 113,4 л/мин, при этом цифровой измерительный комплекс станда обеспечивает одновременную обработку информации, поступающей с восьми датчиков давления масла, семи датчиков расхода масла, трёх датчиков угловых перемещений, двух датчиков температуры, семи преобразователей тока и семи преобразователей напряжения. Универсальное гидрооборудование станда и наличие цифрового контрольно-измерительного комплекса, помимо исследования гидродинамических характеристик системы управления, позволяет так же проводить на стенде приёмосдаточные испытания и входной контроль гидроузлов при серийном производстве.

Для более полного изучения динамических процессов, протекающих в гидросистеме трансмиссии танка, необходимо дальнейшее совершенствование стандового оборудования с целью максимального приближения конструкции гидросистемы станда к конструкции гидросистемы танка в части длин, сечений и конфигурации трубопроводов, введения в гидросистему откачивающих насосов, бортовых коробок передач с управляемым электроприводом и регулируемой нагрузкой на выходных звеньях для имитации реальных условий движения – прямолинейное движение, поворот, реверсивное движение по различным типам дорожного покрытия во всём диапазоне передач. При исследовании динамических процессов, протекающих в гидросистеме танка, так же следует учитывать влияние окружающей среды. При эксплуатации ВГМ в регионах

с жаркими климатическими условиями прогнозировать безотказную совместную работу гидрооборудования системы управления движением танка, а так же заранее оценить влияние температуры окружающей среды на функционирование узлов гидросистемы и, как следствие, на подвижность и управляемость танка достаточно сложно. Поэтому при последующей модернизации стенда планируется ввести в его состав термокамеру с целью изучения влияния температурных факторов на систему управления движением танка в целом.

#### Литература

1. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. –376 с.
2. Данилов Ю.А., Кирилловский Ю.Л., Колпаков Ю.Г. Аппаратура объёмных гидроприводов. Рабочие процессы и характеристики. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
3. Денисов А.Я., Нагорный В.С. Пневматические и гидравлические устройства автоматики. – М.: Высшая школа, 1978. –214 с.
4. Колесов В.А. Гидросистемы трансмиссий гусеничных машин (конструкция и расчёт). – М.: ЦНИИинформации, 1978. –195 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Gamyinin N.S. Gidravlicheskiy privod sistem upravleniya. – М.: Mashinostroenie, 1972. –376 p.
2. Danilov Yu.A., Kirillovskiy Yu.L., Kolpakov Yu.G. Apparatura ob'yomnyih gidroprivodov. Rabochie protsessyi i harakteristiki. – М.: Mashinostroenie, 1990. –272 p.
3. Denisov A.Ya., Nagorniy V.S. Pnevmaticheskie i gidravlicheskie ustroystva avtomatiki. – М.: Vyisshaya shkola, 1978. –214 p.
4. Kolesov V.A. Gidrosistemyi transmissiy gusenichnyih mashin (konstruktsiya i raschyot). – М.: TsNIIinformatsii, 1978. –195 p.

УДК 681.527

Галушка Ю.В., Літвін-Попович І.А., Слюсаренко Ю.О., Сасенко Д.В., Клименко І.В.,  
Зимін Д.Б.

#### **ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ТА РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОСИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ ТАНКА**

Наведені принципи відтворення спеціальних технологій, які дозволяють досліджувати об'єкт керування (танк) сумісно з системою керування у стендових умовах. Розроблена гідравлічна схема стенду для дослідження гідросистеми керування рухом

танку, формалізовані вимоги до неї, наведені принципи функціонування стенду та схема розміщення гідрообладнання.

Бибик Д.В.

**К ВОПРОСУ О ГИДРООБЪЕМНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ**

Военная история XX в. и опыт боевого применения бронетанковой техники (БТТ) вооруженными силами разных стран мира показывает, что техническое совершенство какого-либо образца данного вида вооружения в значительной мере определяется выбором компромисса между тремя основными его показателями – *защищенностью, огневой мощностью и подвижностью*. При этом параметры подвижности неявно влияют как на показатели защищенности – более подвижную боевую бронированную машину (ББМ) сложнее поразить, так и на показатели огневой мощи – более подвижная ББМ за более короткий промежуток времени может выйти на позицию, и с большей вероятностью выполнить боевую задачу. Современная военная наука определяет понятие *подвижности* ВГМ, как способность *преодолеть заданный маршрут за определенный промежуток времени*. Подвижность зависит от многих других характеристик – быстроходности, управляемости, приемистости, способности преодолевать трудные участки пути, которые, в свою очередь, зависят от работы трансмиссии. Традиционно в качестве трансмиссий военных гусеничных машин (ВГМ) использовались ступенчатые механические трансмиссии. При этом, несмотря на их сравнительно высокий КПД, машинам с такими трансмиссиями присущи заметные *недостатки*:

- ступенчатое управление передачи мощности от двигателя к ведущим колесам;
- особенности прохождения машиной поворота, который достигается за счет торможения одного борта при сохранении скорости другого борта, в результате чего снижается скорость прохождения поворота машиной в целом;
- низкие эргономические показатели условий труда механика-водителя, обусловленные необходимостью частого переключения передач вручную;
- низкие показатели комфортности экипажа, обусловленные возникновением ударных нагрузок в деталях трансмиссии, которые при наличии механической связи корпуса и движителя приводят к резким толчкам ВГМ в продольном направлении;
- затрудненное управление движением гусеничной машины по дорогам с твердым покрытием с высокой скоростью, так как это требует от механика-водителя очень высокой квалификации, а также низкая маневренность при преодолении препятствия типа «змейка».

Таким образом, требованием времени стало проектирование новых схем и систем трансмиссии, обеспечивающих бесступенчатое регулирование передачу мощности и плавное управление поворотом объектов БТТ. Поэтому для повышения свойств подвижности тяжелых ВГМ конструкторами многих стран предпринимались попытки создания гидро- и электромеханических трансмиссий.

Поскольку до настоящего времени электромеханическая трансмиссия не нашла широкого применения на серийных образцах ВГМ, далее будут рассматриваться особенности применения только гидравлического привода.

При создании гидромеханических трансмиссий транспортных средств можно идти двумя путями:

- создавать полнопоточную трансмиссию;
- создавать трансмиссию, работающую в параллельном потоке мощности.

Первый путь является приемлемым для сравнительно легких транспортных средств – легковых и грузовых автомобилей, тракторов, легких гусеничных машин (массой до 10 т), либо же для тяжелых карьерных самосвалов, имеющих полную массу порядка сотен тонн (гидротрансмиссия фирмы «Секмафер» для самосвала массой 308 т) [1].

Для тяжелых гусеничных машин – танков, боевых машин пехоты, – такая схема является неприемлемой, так как с ростом передаваемого потока мощности нелинейно и в значительной степени возрастают потери в гидравлической трансмиссии. Потери мощности при этом могут достигать 20 % и более, что нивелирует главное преимущество гидротрансмиссий – возможность бесступенчатого и автоматизированного регулирования крутящего момента. Поэтому для этих транспортных машин применяется многопоточная компоновка трансмиссии [1, 2]. В настоящий момент усилия ведущих фирм сосредоточены на проектировании гидромеханических трансмиссий на основе *гидрообъемных передач* (ГОП), работающих в параллельном потоке мощности.

Впервые гидрообъемную механическую трансмиссию (ГОМТ) пытались применить английские конструкторы при создании первых танков во время 1-й мировой войны. Однако первые образцы имели высокую стоимость, обладали большими габаритами, массой и отличались низкой надежностью. И в последующие несколько десятилетий в разных странах не удавалось создать образцы гидropередач, которые были бы лишены указанных недостатков. Лишь в 60-х гг. XX в. на Западе стали появляться приемлемые конструкции ГОП, преимущественно аксиального типа, которые стали постепенно применяться в механизмах поворота танков.

В конце 70-х гг. в КП ХКБМ им. А.А. Морозова была предпринята попытка сделать ГОМТ для танка. Были разработаны и изготовлены роторно-поршневые гидромашинны, подвергнутые затем динамическим испытаниям на экспериментальном стенде. Конструкция гидромашин не была подкреплена серьезными исследованиями и расчетами, что и привело к их поломке, и в итоге работы по ГОП были свернуты более чем на 20 лет [4]. Вторая волна интереса КП ХКБМ к применению гидромашин в танковых трансмиссиях возникла, когда стало известно о создании в США трансмиссии НМРТ-1250, предназначенной для тяжелой бронетехники.

Как свидетельствует практика конструирования и применения гидравлических устройств в технике, гидравлические машины с аксиальным расположением цилиндров работают на более высоких скоростях, чем машины радиального типа. Также они имеют преимущество по массе. Так, при прочих равных условиях, масса аксиальных машин примерно в 2 раза меньше, чем масса радиальных. Однако гидравлические машины радиального типа способны выдерживать значительно большие нагрузки, чем аксиальные. А, кроме того, радиальные роторно-поршневые машины с шариковыми поршнями лишены недостатка радиальных гидромашин с другими типами поршней – они являются быстроходными, и могут применяться в транспортном машиностроении.

Проанализировав ряд работ отечественных ученых [1, 2, 3], можно отметить такие *преимущества* гидрообъемных механических трансмиссий:

- ГОМТ на базе радиально-поршневых гидромашин с шариковыми поршнями обладают наименьшей массой и габаритами по сравнению с трансмиссиями других типов той же мощности, за счет того, что центральный вал трансмиссии проходит внутри оси цапфы ГОП, а картер трансмиссии является одновременно картером гидropередачи;

- применение ГОМТ обеспечивает плавное бесступенчатое регулирование передаточного отношения трансмиссии и скорости движения, а также регулирование поворота ГМ с любым радиусом, что значительно повышает управляемость ВГМ;
  - ГОМТ позволяет работать двигателю ВГМ как в режиме наибольшей мощности, так и в режиме минимального расхода топлива во всех скоростных диапазонах движения;
  - ВГМ, оснащенная ГОМТ, обладает лучшей тяговой характеристикой по сравнению с ВГМ, оснащенной ступенчатой механической трансмиссией;
  - ГОМТ обладают свойством реверса, что дает возможность ВГМ переходить с движения вперед к движению задним ходом без остановки и переключения передач, а также это обеспечивает разворот ВГМ на месте с нулевым радиусом;
  - применение ГОМТ обеспечивает автоматизацию управления движением, что позволяет существенно повысить эргономические показатели условий труда механика-водителя ВГМ;
  - применение ГОМП позволяет повысить надежность силового агрегата и других узлов ВГМ, так как устранена жесткая кинематическая связь между двигателем и движителем, и в гидропередаче происходит демпфирование ударных нагрузок.
- Однако гидрообъемным передачам присущи и некоторые *недостатки*:
- работа гидрообъемных приводов, входящих в состав ГОМТ, в режимах с максимальной нагрузкой приводит к высокому уровню объемных потерь рабочей жидкости, которую затем необходимо отводить, охлаждать и заново направлять в область подпитки;
  - коэффициент полезного действия ГОМТ на 7–10 % ниже по сравнению со ступенчатой механической трансмиссией, что обусловлено потерями на внутреннее трение рабочей жидкости и ее утечками в гидромашинах, которые входят в состав ГОМТ;
  - в ГОМТ могут иметь место резкие перепады давления, в т.ч. и гидравлические удары, которые возникают, когда меняются местами полости давления нагрузки и подпитки, что может привести к снижению ресурса гидропередачи;
  - для нормальной работы ГОМТ важное значение имеет определенная вязкость рабочей жидкости, которая зависит от ее температуры, поэтому работоспособность трансмиссии чувствительна к изменению температуры окружающей среды;
  - внутри ГОМТ при некоторых режимах работы (на поворотах) возникает циркуляция мощности, приводящая к существенным потерям мощности и интенсивному тепловыделению.

Для отечественного танкостроения традиционным является поперечное расположение силового агрегата и трансмиссии в моторно-трансмиссионном отделении (МТО). За счет этого, а также благодаря применению 2-тактных многотопливных двигателей оригинальной конструкции семейства 5ТД (6ТД), достигается уменьшение габаритов и силуэта украинских танков, при одновременном сохранении высокой удельной мощности по сравнению с зарубежными образцами. Оборудование перспективных отечественных боевых бронированных машин гидрообъемными трансмиссиями позволяет создать достаточно компактную конструкцию МТО [5], однако порождает массу чрезвычайно сложных взаимосвязанных проблем, требующих своего решения, которые можно разделить на 2 типа. Это, прежде всего, *вопросы разработки и выбора компоновочных схем*, обеспечивающих размещение сконструированной новой гидромеханической трансмиссии в ограниченном пространстве МТО гусеничной машины. Во вторую группу входят *вопросы постановки и решения ряда физико-механических задач*, таких как обеспечение прочности и жесткости наиболее нагруженных и ответственных дета-

лей и элементов гидропередачи, на которые значительно возрастают нагрузки, что напрямую может сказываться на работоспособности ГОП.

Результатом совместного труда специалистов КП ХКБМ им. А.А. Морозова, ЗАО «НИИГидропривод» и НТУ «ХПИ» стало создание гидрообъемной радиально-поршневой передачи с шариковыми поршнями ГОП-900, не имеющей аналогов в странах СНГ. К настоящему моменту в КП ХКБМ построено 3 гидропередачи ГОП-900, причем 2 из них успешно прошли предварительные ходовые испытания в составе объекта бронетанковой техники (сентябрь 2006 г.), подтвердив тем самым успешность разрабатываемой конструкции. При этом разработчиками гидропередачи в рамках конструкторско-доводочных исследований решались следующие задачи:

- повышения теплостойкости и износостойкости контртел цилиндро-поршневых групп за счет применения специальных, не традиционных для гидроприводов материалов (в том числе керамических, полимерных и композиционных) и рабочих жидкостей;
- обеспечения эффективной смазки поршневых групп, и за счет этого – работоспособности конструкции при работе на холостом ходу при максимальном и минимальном («нулевом») значениях эксцентриситета и в полном диапазоне частот вращения;
- выбора оптимальных значений зазоров в поршневых парах и разработки методики расчета утечек;
- формирования конфигурации и условий течения рабочей жидкости в картере гидропередачи, обеспечивающих минимизацию потерь мощности [6].

Предел технологического совершенства гидропередачи типа ГОП-900 пока не достигнут. Поэтому для более полного использования теоретических преимуществ гидромашин такого типа, все еще остается открытым вопрос *рационального выбора конструктивных параметров* и материалов.

В отечественной литературе накоплен достаточно большой объем знаний в области применения ГОП. Прежде всего, это основополагающие работы Башты Т.М., Прокофьева В.Н., Кисточкина Е.С. Анализ литературных источников [1, 3, 4, 7, 8, 9, 10] показывает, что подавляющее большинство работ по гидрообъемным машинам посвящено методам расчета и построению математических моделей для решения довольно узкого круга задач, среди которых можно указать:

- исследование усилий на отдельных элементах (поршни, плунжеры) гидромашин;
- исследование коэффициента полезного действия гидромашин;
- анализ потерь как механических, так объемных и гидравлических;
- исследования кинематических, гидравлических и энергетических параметров гидропередач;
- изучение вопросов рационального применения ГОП в целом как бесступенчатого редуктора в трансмиссиях гусеничных машин.

Однако в изученных работах практически отсутствуют сведения по радиально-поршневым гидропередачам с шариковыми поршнями, так как гидромашин такого типа пока еще мало распространены, а также *практически не рассмотрены вопросы исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов гидропередач*, их прочности и жесткости. Этой теме посвящены лишь некоторые статьи [11, 12, 13], в которых предприняты попытки исследования НДС отдельных деталей ГОП.

Чтобы восполнить это пробел, в КП ХКБМ проводятся исследования, направленные на повышение эксплуатационных характеристик гидрообъемных механических трансмиссий военных гусеничных машин. Разработана математическая модель дефор-

мирования блока цапфенных распределителей (БЦР) ГОП, и проведено исследование его НДС [14, 15], а также планируется решить следующие научные задачи:

1. Разработать адекватные математические модели для исследования НДС, а также для решения задач оптимизации геометрической формы и конструктивных параметров наиболее нагруженных и ответственных деталей гидрообъемных передач.

2. Оценить влияние конструктивных параметров БЦР гидрообъемной передачи на ее производительность, гидравлические и мощностные потери.

3. Осуществить постановку и решить задачу выбора рациональных конструктивных параметров (в частности – конфигурации рабочих каналов) БЦР ГОП по критериям жесткости.

Из проведенного анализа литературы следует, что на сегодня пока еще отсутствует комплексная математическая модель, отражающая НДС элементов гидропередачи ГОП-900. Поэтому создание такой комплексной модели является первоочередной и актуальной задачей. Данная модель должна обладать следующими свойствами:

– адекватность модели реальным процессам, имеющим место в гидропередаче;  
– возможность подтвердить ее адекватность путем проведения косвенных замеров и соответствующих численных экспериментов;

– возможность исследования еще не изученных процессов и явлений, имеющих место в гидропередаче, на этой модели;

– возможность оптимизации геометрических параметров гидропередачи, используя для вычисления функций цели задач оптимизации значения определенных характеристик модели.

В качестве основного инструмента для проведения исследований выбран метод конечных элементов (МКЭ), который стал одним из основных методов исследования НДС машиностроительных конструкций. Создание такой комплексной конечно-элементной модели позволяет всесторонне изучить аспекты деформирования основных элементов гидропередачи ГОП-900, выбрать для них рациональные геометрические параметры, исходя из соображений соблюдения условий жесткости, прочности и потерь. А также позволяет использовать наработки по ГОП-900 при создании целого семейства радиально-поршневых гидропередач с шариковыми поршнями.

#### Литература

1. Петров В.Г. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин. М.: Машиностроение, 1988. – 248 с.

2. Объемные гидромеханические передачи: Расчет и конструирование / О.М. Бабаев, Л.Н. Игнатов, Е.С. Кисточкин и др. Под общ. ред. Е.С. Кисточкина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 256 с.

3. Автоматизированное управление гидрообъемными трансмиссиями и механизмами поворота гусеничных машин // Е.Е. Александров, М.Д. Борисюк, Я.В. Грита, В.А. Кононенко. – Харьков: ХГПУ.– 1995. –176 с.

4. Теоретическое обоснование и выбор конструктивных параметров радиально-поршневых гидромашин, работающих в составе ГОМТ гусеничных машин и разработка системы автоматического управления движением гусеничных машин с ГОМТ // Научно-технический отчет. Харьков: НПО «Политехник», 2000. – 242 с.

5. Бабаев О.М., Глущенко В.А., Голубев и др. Гидромеханические трансмиссии – средство повышения конкурентоспособности колесных и гусеничных машин // Приводная техника. – 1998. – №9.

6. Аврунин Г.А., Кабаненко И.В., Хавиль В.В. и др. Объемная гидropередача с шариковыми поршнями ГОП-900: характеристики и технический уровень // *Механiка та машинобудування*. – 2004. – №1. – С. 14–21.
7. Объемные гидравлические приводы / Т.М. Башта, И.З. Зайченко, В.А. Ермаков и др. – М.: Машиностроение, 1969.– 628 с.
8. Машиностроительный гидropривод / Под ред. засл. деят. науки и техники РСФСР докт. техн. наук проф. В.Н. Прокофьева.– М.: Машиностроение, 1978. – 496 с.
9. Ловцов Ю.И. Анализ механических потерь в поршневых гидромашинах. В кн.: *Гидropривод и гидроавтоматика в машиностроении*.– М.: Машиностроение.– 1966.– С. 255–267.
10. Аврамов В.П., Самородов В.Б., Кузьминский В.А. К расчету усилий, действующих в гидростатически разгруженном поршне радиально-поршневого гидронасоса // *Проблемы машиностроения*. К.: 1981. Вып. 11. С. 51–55.
11. Пасынков Р.М., Кондрахин Г.А., Елизаров С.П. Расчет напряженно-деформированного состояния корпуса аксиально-поршневого гидромотора // *Вестник машиностроения*. – 1992. – №5. С. 6–7.
12. Ткачук А.В. К вопросу о влиянии количества нагруженных цилиндров на напряженно-деформированное состояние корпуса гидронасоса ГОП: расчет и эксперимент // *Механiка та машинобудування*. – 2004. – №2. С. 77–84.
13. Ткачук А.В., Васильев А.Ю., Мартыненко А.В., Веретельник Ю.В. Влияние конструктивных факторов на напряженно-деформированное состояние корпусов гидрообъемных передач // *Механiка та машинобудування*. – 2004. – №1. С. 78–84.
14. Бибик Д.В., Аврунин Г.А., Кабаненко И.В. Анализ жесткости блока цапфенных распределителей гидрообъемной передачи типа ГОП-900 // *та машинобудування*. – 2005. – №2. С. 40–44.
15. Аврунин Г.А., Бибик Д.В., Кабаненко И.В. Исследование объемной гидropередачи с шариковыми поршнями // *Зб. наук. праць – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – Вип. 73. – С. 139–145.*

Bibliography (transliterated)

1. Petrov V.G. *Gidroob'yomnyie transmissii samohodnyih mashin*. М.: Mashinostroenie, 1988. – 248 p.
2. *Ob'emnyie gidromehanicheskie peredachi: Raschet i konstruirovaniye* O.M. Babaev, L.N. Ignatov, E.S. Kistochkin i dr. Pod obsch. red. E.S. Kistochkina. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. – 256 p.
3. *Avtomatizirovannoye upravleniye gidroob'emnyimi transmissiyami i mehanizmami povorota gusenichnyih mashin* E.E. Aleksandrov, M.D. Borisyuk, Ya.V. Grita, V.A. Kononenko. – Harkov: HGPU.– 1995. –176 p.
4. *Teoreticheskoye obosnovaniye i vyibor konstruktivnyih parametrov radialno-porshnevnyih gidromashin, rabotayuschih v sostave GOMT gusenichnyih mashin i razrabotka sistemyi avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem gusenichnyih mashin s GOMT* Nauchno-tehnicheskiiy otchet. Harkov: NPO «Politehnik», 2000. – 242 p.
5. *Babaev O.M., Gluschenkov V.A., Golubev i dr. Gidromehanicheskie transmissii – sredstvo povyisheniya konkurentosposobnosti kolesnyih i gusenichnyih mashin* Privodnaya tehnika. – 1998. – N9.

6. Avrunin G.A., Kabanenko I.V., Havil V.V. i dr. Ob'emnaya gidroperedacha s sharikovymi porshnyami GOP-900: harakteristiki i tehniceskii uroven Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2004. – #1. – p. 14–21.
7. Ob'emnyie gidravlicheskie privodyi T.M. Bashta, I.Z. Zaychenko, V.A. Ermakov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1969.– 628 p.
8. Mashinostroitelnyiy gidroprivod / Pod red. zasl. deyat. nauki i tehniki RSFSR dokt. tehn. nauk prof. V.N. Prokofeva.– M.: Mashinostroenie, 1978. – 496 p.
9. Lovtsov Yu.I. Analiz mehanicheskikh poter v porshnevnykh gidromashinah. V kn.: Gidroprivod i gidroavtomatika v mashinostroenii.– M.: Mashinostroenie.- 1966.– p. 255–267.
10. Avramov V.P., Samorodov V.B., Kuzminskiy V.A. K raschetu usiliy, deystvuyuschih v gidrostaticheski razgruzhennom porshne radialno-porshnevogo gidronasosa Problemy mashinostroeniya. K.: 1981. Byip. 11. p. 51–55.
11. Pasyinkov R.M., Kondrahin G.A., Elizarov S.P. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korpusa aksialno-porshnevogo gidromotora Vestnik mashinostroeniya. – 1992. – #5. p. 6–7.
12. Tkachuk A.V. K voprosu o vliyani kolichestva nagruzhennykh tsilindrov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie korpusa gidronasosa GOP: raschet i eksperiment Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2004. – #2. p. 77–84.
13. Tkachuk A.V., Vasilev A.Yu., Martynenko A.V., Veretelnik Yu.V. Vliyanie konstruktivnykh faktorov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie korpusov gidroob'emnykh peredach Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2004. – #1. p. 78–84.
14. Bibik D.V., Avrunin G.A., Kabanenko I.V. Analiz zhestkosti bloka tsapfennykh raspredeliteley gidroob'emnoy peredachi tipa GOP-900 ta mashinobuduvannya. – 2005. – #2. p. 40–44.
15. Avrunin G.A., Bibik D.V., Kabanenko I.V. Issledovanie ob'emnoy gidroperedachi s sharikovymi porshnyami Zb. nauk. prats – Harkiv: UkrDAZT, 2006. – Vip. 73. – p. 139–145.

УДК 62-585.23

Бібік Д.В.

### **ДО ПИТАННЯ ПРО ГІДРООБ'ЄМНУ МЕХАНІЧНУ ТРАНСМІСІЮ**

В статті розглянуто стан розвитку гідрооб'ємних передач радіального типу із шариковими поршнями на сучасному етапі. Проаналізовано повноту вивчення питань конструювання гідрооб'ємних трансмісій типу ГОП-900, та визначено напрямки подальших досліджень із пошуку їх раціональних конструктивних параметрів.

УДК 661.842.532+668.8

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л.

### КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ФОСФОГИПСА С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Почему извлечение редкоземельных элементов из отвалов фосфогипса наиболее перспективное и выгодное направление в решении задачи комплексной переработки фосфогипса:

- извлечение редкоземельных элементов из отвалов фосфогипса это, прежде всего, освоение запасов техногенных месторождений;
- существует устойчивая тенденция резкого увеличения спроса и стоимости редкоземельных элементов;
- запасы природного гипса ограничены и исчерпываются из-за истощения старых и невозможности разработки новых месторождений по экологическим и экономическим причинам;
- стоимость добычи и очистки природного гипса приближается к стоимости гипса, полученного из фосфогипса.

Редкоземельные металлы, или лантаноиды, представлены 15 химически подобными элементами (с порядковыми номерами от 57 – лантан до 71 – лютеций), теоретически объединенными в одной основной группе периодической таблицы Менделеева. В коммерческой практике в эту группу включают еще два элемента, находящиеся в таблице над лантаном, – иттрий с порядковым номером 39 и скандий с номером 21 (его природные источники и области применения существенно отличаются от остальных редкоземельных металлов). Редкоземельные элементы подразделяются на три группы: легкие, средние и тяжелые. В первую группу входят: лантан, церий, празеодимий, неодим; во вторую – прометий (в природе не встречается), самарий, европий, гадолиний; в третью – тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций, иттрий и скандий.

В современных условиях XXI столетия приемлемо только комплексное использование высокоценного сырья, как на стадии его обогащения, так и при последующей химико-металлургической переработке получаемых концентратов, на принципах экономической и экологической эффективности использования недр. Например, по данным российских источников, за 80-летний период освоения хибинского месторождения извлечено 1 млрд. 550 млн. т руды (примерно половина промышленных запасов), выработано 620 млн. т апатитового концентрата. При этом не извлечено в промышленном масштабе ни одной тонны редкоземельных металлов (РЗМ). Практически утеряно не менее 6 млн. т ценнейших металлов и около 20 млн. т стронция, что составляет трехкратный мировой баланс этого стратегического металла. Основная масса этих металлов находится в отвалах и, в частности, в отвалах фосфогипса в России, Украине и Белоруссии.

США, как нигде в мире, достигнул успеха в комплексной переработке фосфогипса. Прежде всего, это относится к извлечению редкоземельных элементов (РЗЭ). Следует заметить, что уже в 60-е годы прошлого столетия ряд работ по РЗЭ в США курируются Министерством по атомной энергетике, и по понятным причинам являются закрытыми. Но даже известные предложения, такие, как получение сульфата аммония, серной кислоты из фосфогипса говорят о масштабности работ по его использованию. В

структуре потребления РЗЭ в США на катализаторы для нефтехимии (крекинг нефти и оргсинтез) используется 55 %, в металлургии 22 %, на стекло и керамику 18 % всей потребляемой редкоземельной продукции в США [1].

За период 1990–2005 гг. шел динамичный рост производства и потребления редкоземельной продукции. Причем с 1990 г. лидером в данной сфере стал Китай, который сегодня добывает и производит 85 % мировой первичной редкоземельной продукции. Его развивающаяся промышленность потребляет пока немногим более четверти вырабатываемой первичной продукции. Начиная с 2003 г. Китай снизил долю экспорта первичных концентратов и увеличил мощности по разделению на индивидуальные элементы. В настоящее время Китай стал мировым лидером в производстве дорогих редкоземельных продуктов, товаров и многих изделий почти для всех современных сфер использования редкоземельных металлов. По оценкам специалистов, спрос на редкоземельную продукцию будет расти, и сегодня есть уверенный прогноз на ближайшие годы. Ежегодный рост потребления неразделенных редкоземельных металлов составляет 3–5 % в год, разделенных – до 25 % в год. Стоимость редкоземельных элементов на мировом рынке составляет от 116 до 1640 \$/кг в зависимости от металла. Прогноз мирового потребления РЗМ в 2010 г. представлен на рис. 1 [2].

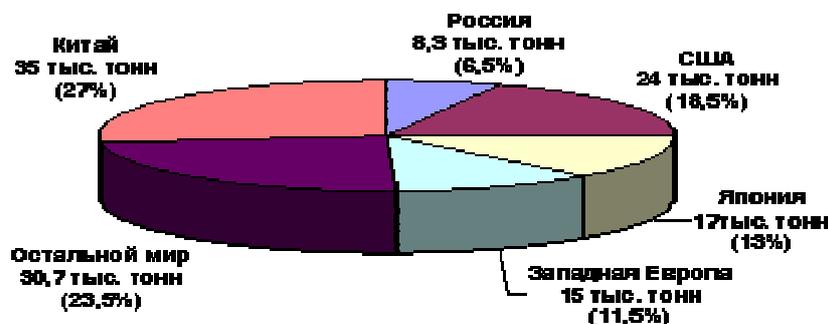


Рисунок 1 – Прогноз мирового потребления РЗМ в 2010 г. [2]

Рынок сбыта редкоземельных металлов состоит из отраслей потребляющих неразделенную продукцию, таких как, производство стекла, нефтехимия и нефтепереработка (катализаторы для крекинга нефти, присадки в топливо и т.п.), металлургия, производство аккумуляторов, полировальных порошков и т.д. Другой сегмент рынка связан с потреблением разделенные редкоземельные элементы:

- церий для производства каталитических фильтров-нейтрализаторов выхлопных газов автомобилей;
- самарий и неодим для магнитов;
- лантан и неодим для люминофоров, керамических конденсаторов;
- иттрий, европий, диспрозий, эрбий, тербий и гадолиний используется в электронике и радиотехнической промышленности.

Основным источником фосфатного сырья в Украине являлся хибинский апатит, который перерабатывался на минеральные удобрения. Причем эта переработка была выгодна и без извлечения редкоземельных элементов (0,7–1 %), стронция – 2,3 %, фтора – 3,1 %. Однако в настоящее время спрос на редкоземельные металлы резко возрос, и вместе с ним выросла цена на эти материалы. При обработке фосфатного сырья в фосфогипс переходит до 90–95 % редкоземельных элементов, а степень их извлечения в виде хлоридов составляет примерно 95 %. При этом из 1 т фосфогипса можно извлечь до 4 кг хлорида церия стоимостью до 850 \$.

Важнейшей отличительной особенностью имеющихся на Украине отвалов фосфогипса, полученного после переработки хибинского апатитового концентрата, является то, что он, в отличие от остальных источников редких земель, не содержит радиоактивных элементов. Полученные из него редкоземельные элементы не радиоактивны и не требуют дезактивации.

Процесс извлечения редких земель из фосфогипса отработан в полупромышленном масштабе еще в СССР, но он достаточно трудоемкий и требует значительных затрат на капитальное строительство и организацию дополнительного производства.

Резюмируя изложенное, можно сделать заключение, что наиболее перспективным направлением утилизации фосфогипсовых отвалов является его комплексная переработка, которая в первую очередь включает в себя извлечение редкоземельных элементов, стронция и т.д. К реализации может быть предложена любая технология комплексной переработки фосфогипса, которая позволяет получить из него следующие продукты:

- окислы и соли редкоземельных элементов;
- сульфат натрия;
- карбонат кальция;
- углекислый стронций.

#### **Разработанные технологии комплексной переработки фосфогипса, защищенные патентами**

Фосфогипс в больших количествах содержит тяжелые металлы, такие как кадмий, хром, кобальт, ртуть, медь, свинец, никель, цинк и стронций, и также дорогостоящие редкоземельные элементы. Большинство фосфатных руд обогащено ураном, соединения которого, растворяясь в кислоте, переходят в экстракционную фосфорную кислоту, а в фосфогипсе остается радий.

Существует достаточно большое количество известных и новых методов по извлечению солей редкоземельных элементов из фосфогипса. Далее будут рассмотрены наиболее перспективные в смысле промышленного освоения отвалов фосфогипса.

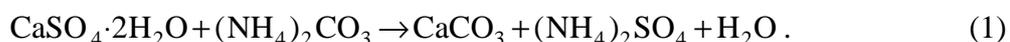
1. Все компоненты могут быть извлечены из фосфогипса с получением экологически чистой гашеной извести или безводного гипса [3].

Если фосфогипс последовательно обрабатывать хлоридом и сульфатом аммония, то в результате можно получить экологически чистый безводный гипс. Если заменить сульфата аммония на щелочь, то получается экологически чистая гашеная известь. В обоих случаях получаются концентраты редкоземельных элементов и тяжелых металлов.

Способы универсальные и могут быть использованы для любого вида фосфогипса непосредственно при производстве минеральных удобрений или при разработке его отвалов независимо от исходного фосфатного сырья. Так фосфогипс из фосфоритов Каратау содержит до 20 % нерастворимого остатка, в котором находится около 5,4 % оксида лантана, что составляет примерно 10,8 кг на 1 т фосфогипса. По предложеной схеме лантаноиды извлекаются в виде хлоридов, что дает около 7 кг хлорида лантана. По оценке авторов экономическая эффективность очистки фосфогипса по первому способу составляет 14 273 грн. при получении гашеной извести эффект на каждую тонну обработанного фосфогипса – 8 393 грн.

2. Схема комплексной переработки фосфогипса в сульфат аммония и карбонат кальция с извлечением редкоземельных элементов [4].

Одним из способов использования фосфогипса в народном хозяйстве может быть его конверсия в сульфат аммония и карбонат кальция по реакции



Этот способ известен достаточно давно и его главным недостатком является трудность операции фильтрования карбоната кальция, так как последний образует мелкие кристаллы, и отмывка осадка затруднена. В настоящее время интерес к процессу (1) возобновился из-за возможности получения редкоземельных элементов и сульфата аммония. Последний используется не только как азотосодержащее удобрение, но и как промежуточный продукт при азотно-кислотном разложении фосфатов. Получение чистого мела также актуальная задача, в связи с удорожанием производства чистого природного мела. Редкоземельные элементы выделяются в осадок при перекристаллизации карбоната кальция и подлежат дальнейшей переработке на специальных заводах.

В зависимости от способа введения карбоната аммония процесс конверсии по уравнению (1) может быть жидкостным, газовым или газожидкостным. Способ жидкостной конверсии предполагает предварительную стадию приготовления раствора карбоната аммония в отдельном аппарате по реакции:



В процессе газовой конверсии реакцию (2) проводят в водной суспензии фосфогипса при одновременном введении в нее аммиака и оксида углерода. Газожидкостный способ основан на использовании, как раствора карбоната аммония, так и газообразных компонентов [5,6]. В реактор конверсии фосфогипса помимо готового раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  подают газообразные реагенты ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ) в количестве 10–15 % от стехиометрической нормы на  $\text{CaO}$  фосфогипса. При этом тепло, выделяющееся при взаимодействии газообразных реагентов, компенсирует потребность в энергии процесса с учетом обеспечения температуры реакции 50–55 °С; иными словами, обеспечиваются изотермические условия процесса конверсии фосфогипса.

Отмытый фосфогипс превращается на стадии конверсии в раствор сульфата аммония и осадок  $\text{CaCO}_3$ . Осадок после сушки прокаливается и превращается в фосфоизвесть, которая затем растворяется и проходит взаимодействие с хлористым аммонием. В осадок, выделяемый на этой стадии, переходят соединения стронция и РЗЭ. Хлористый кальций превращается, взаимодействуя с карбонатом аммония, в  $\text{CaCO}_3$ , а раствор  $\text{NH}_4\text{Cl}$  возвращается в цикл.

Основным недостатком этого способа является циркуляция в системе газообразных  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ , выделение которых из газовых потоков требует мощного абсорбционного оборудования, а также систем очистки газов, выбрасываемых в атмосферу. При комбинировании производства углеаммонийных солей (УАС) и переработки фосфогипса значительно упрощается процесс, полностью исключается переработка газовой фазы. Для конверсии фосфогипса используется раствор  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ .

Для выбора оптимальных условий проведения процесса конверсии стояла задача установить влияние температуры, избытка и концентрации  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , времени проте-

кания процесса, интенсивности перемешивания и различных примесей на степень конверсии.

Температура процесса конверсии по данным многих исследований принимается не выше 50–55 °С, так как при больших температурах наблюдается разложение карбоната аммония,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  переходят в газовую фазу, снижая эффективность процесса.

Исследована реакция фосфогипса с карбонатом аммония и карбонатом натрия [7]. Однако здесь представляло интерес определение максимального содержания SrO в карбонате кальция, а не степень конверсии. Кроме того, изучалось влияние загрязнений (Sr, Fe, Si, Al, Ti) в отходе производства фосфорной кислоты - сульфате кальция на степень превращения его в карбонат кальция [8]. Утверждается, что содержание Sr и Si в гипсе повышает степень конверсии, а содержание Ti – снижает. Примеси Fe и Al не влияют на этот процесс.

Конверсия фосфогипса в лабораторных условиях проводилась на экспериментальной установке, основным элементом которой служил реактор с мешалкой. Реактор помещался в термостат, с помощью которого в нем поддерживалась заданная температура. В качестве сырья использовался фосфогипс, выделившийся при производстве ЭФК, отмытый от  $\text{P}_2\text{O}_5$  до pH=4,4. Для облегчения дозирования фосфогипс перед опытом сушили до постоянного веса. Конверсию проводили раствором карбоната аммония концентрацией 30 % масс. В реактор помещался раствор карбоната аммония, и его температура доводилась до заданной (например, 50 °С). В раствор в сухом виде вводился фосфогипс. Скорость вращения мешалки 510 об/мин, время конверсии составляло 120 мин. После реакции вся пульпа сушилась до постоянного веса при температуре 100 °С. После измельчения и усреднения пробы проводили анализ продукта на содержание  $\text{SO}_{30}$  и  $\text{SO}_{3в}$  весовым методом.

Все концентрации  $\text{SO}_3$  брались в пересчете на абсолютно сухое вещество. Содержание  $\text{SO}_3$  в исходном фосфогипсе составило 55,14 %. По полученным результатам исследований степень разложения фосфогипса (в условиях  $t = 50$  °С, избыток карбоната аммония – 30 % от стехиометрии, концентрация раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  – 30 %, интенсивность перемешивания – 510 об/мин, время реакции – 120 мин) практически приближается к 100 %. Некоторое отклонение коэффициента конверсии от 100 % связано с неэффективной работой мешалки, установленной в реакторе. Использование ячеистых мешалок позволяет резко увеличить эффективность перемешивания, сократить время реакции в 1,5–3 раза, снизить потребление электроэнергии на привод.

3. Гидрометаллургическая переработка фосфогипса на сульфат натрия, карбонат кальция, соединения редкоземельных элементов и углекислый стронций [1]

Предложен новый способ переработки фосфогипса, когда максимально извлекаются в товарные продукты соли кальция, сульфатов, редкоземельных элементов и стронция. Количество вторичных отходов минимально, не превышает 1 % от количества перерабатываемого фосфогипса и они представлены в основном двуокисью кремния.

Предложенная технология основана на выщелачивании редкоземельных элементов из твердых остатков в раствор кислотами низких концентраций (56 %) против известных предложений, в которых применяют для выщелачивания концентрированные растворы кислот (30–70 %). Найденное решение позволяет извлекать РЗЭ на 96–98 %, в то время как в известных способах выщелачивание РЗЭ из фосфогипса не превышает 50 %. Разработанный способ упрощает технологический передел стадии извлечения редкоземельных элементов и значительно снижает расход кислоты. В зависимости от

требуваний потребителем редкоземельная продукция может быть получена в необходимой товарной форме. В стандартной реализации технология комплексной переработки фосфогипса позволяет получить: сульфат натрия, карбонат кальция, окислы или соли редкоземельных элементов, углекислый стронций.

Условно в ней можно выделить две стадии: Первая стадия предусматривает выделение основных компонентов фосфогипса и получения товарной продукции на их основе. Продуктами этой стадии являются сульфат натрия высшего сорта ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 99,7 %,  $\text{CaSO}_4$  – 0,04 %) и карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$  – 99 %, белизна – 98 %).

Вторая стадия включает переработку твердого остатка от первой стадии на соединения редкоземельных элементов и стронциевый концентрат с последующим получением из него углекислого стронция. Ввиду малого количества стронция, на тонну перерабатываемого фосфогипса, с целью снижения потерь и улучшения качества углекислого стронция был разработан способ извлечения карбоната стронция, позволяющий получить продукт с низким содержанием хлоридов (Cl – 0,015 %) и высоким содержанием основного вещества ( $\text{SrCO}_3$  – 97 %). На разработанный способ получен патент "Способ получения карбоната стронция" RU № 2223223.

Новизна разработанного способа комплексной переработки фосфогипса защищена патентом "Способ комплексной переработки фосфогипса", RU № 2258036 от 9.06.04.

Предлагаемый способ комплексной переработки фосфогипса направлен на решение экологических проблем, существующих при его хранении в отвалах заводов фосфорных удобрений, при этом снижается отрицательное воздействие компонентов фосфогипса на окружающую среду. Кроме того, предлагаемый путь утилизации фосфогипса позволит выпускать ценную химическую продукцию, имеющую устойчивый спрос на рынке.

#### 4. Способы извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса. ИХТРЭМС им. И.В. Тананаева КНЦ РАН

Разработана новая перспективная технология извлечения лантаноидов из сульфата кальция [9], получающегося в качестве отвального продукта при полугидратном процессе сернокислотной переработки на экстракционную фосфорную кислоту (решение о выдаче патента от 10.11.2003 по заявке России 2002120079). Способ извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса ИХТРЭМС КНЦ РАН. Локшин Э.П., Вершкова Ю.А., Калинин В.Т., Тареева О.А., Ивлев К.Г., Федоров С.Г., Погребняк О.С.

Принципиальной новизной и преимуществом технологии является выщелачивание лантаноидов из фосфополугидрата растворами серной кислоты средних концентраций, что позволило разработать новый способ выделения лантаноидов из раствора выщелачивания в виде сульфатного концентрата, не требующий использования дорогих экстрагентов или поверхностно активных веществ. Сульфатный концентрат позволяет легко получить концентрированный нерадиоактивный азотнокислый раствор лантаноидов, годный для использования в производстве катализаторов, а также получения групповых концентратов и индивидуальных лантаноидов. В технологии не требуется использование несвойственных производству минеральных удобрений реагентов, не образуется дополнительных отходов, не нарушается водный баланс основного производства. При этом снижается экологическая вредность захораниваемого фосфогипса.

В России лантаноиды получают из радиоактивного лопаритового концентрата. В сумме, выделенной из лопаритового концентрата, содержание лантаноидов средней

группы и иттрия мало. Соотношение лантаноидов, содержащихся в хибинском апатитовом концентрате, наиболее соответствует их востребованности потребителями. Соединения лантаноидов используются в атомной промышленности, производстве модифицированных чугунов, специальных сталей, лёгких жаростойких сплавов, магнитов, катализаторов для нефтехимии и нейтрализаторов выхлопных газов автомобилей, стекловарении и многих других целях.

Другой способ извлечения лантаноидов из фосфогипса предложен коллективом авторов Локшин Э.П., Вершков А.В., Вершкова Ю.А., Маслобоев В.А. и защищен патентом. Он основан на положениях работы [10].

Изобретение относится к технологии извлечения лантаноидов из фосфогипса, получаемого при сернокислотной переработке апатитового концентрата на минеральные удобрения. Выщелачивание первой порции фосфогипса осуществляют 2–6 %-ным раствором серной кислоты при соотношении жидкости к твердому телу – 2–3. Раствор выщелачивания отделяют и используют для выщелачивания последующих порций фосфогипса. Концентрацию серной кислоты на каждой стадии увеличивают согласно соотношению  $\Delta c_{\text{H}_2\text{SO}_4} : \Delta c_{\text{P}_2\text{O}_5} \geq 4$ , где  $\Delta c_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  приращение концентрации серной кислоты, мас. %, а  $\Delta c_{\text{P}_2\text{O}_5}$  – приращение концентрации пентаоксида фосфора при выщелачивании предыдущей порции фосфогипса, г/л. Раствор выщелачивания используют не менее трех раз. Предельная концентрация серной кислоты составляет 24 мас. %. Остаток фосфогипса промывают водой. Промывной раствор используют при выщелачивании фосфогипса. Перед выщелачиванием фосфогипс измельчают до крупности 100 мкм. Достижимый результат заключается в повышении эффективности процесса за счет повышения концентрации лантаноидов в растворе в 3 раза (до 3,7 г/л) при обеспечении высокого извлечения (среднее извлечение за 4–5 стадий составляет 32,65–38,68 %), что упрощает дальнейшее выделение концентрата лантаноидов из раствора.

5. Способ извлечения редкоземельных элементов из апатитов и фосфогипса МГУ и Московской государственной академии тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова при участии ВНИИ химической технологии

Предложено "вскрывать" апатит не традиционно применяемыми серной или азотной кислотой, а горячей смесью фосфорной и серной кислот. Это позволяет разделить основные продукты разложения апатита: фосфаты кальция, соли стронция и РЗЭ, а также уловить летучие соединения фтора. Еще несколько химических ухищрений, суть которых авторы не излагают в открытой печати - и удается получить на выходе почти весь фтор (более 97 %), 85–90 % РЗЭ, 70–75 % стронция. В дополнение, разумеется, к целевому продукту – фосфору в виде кислого фосфата кальция, степень извлечения которого составляет около 95 %. Так общая степень использования сырья подбегает к 96 %, а в отход попадает не более 4–6 % апатита.

6. Способ извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса Гомельского университета

Этот способ хорошо известен и базируется на результатах работы [11] и нескольких советских и российских патентах (SU 1818304 А, 30.05.1993. RU 2104938 С1, 20.04.1998. RU 2109686 С1, 27.04.1998).

После извлечения из гомельского фосфогипса редкоземельных металлов, фтора, фтора и при условии отсутствия в нем различных кислот он может использоваться для производства различных вяжущих. Предполагается, что они- будут самой массовой продукцией Гомельского химзавода. При работе на полную мощность завод производит 292 000 т фосфорных удобрений, одновременно ежегодно образуется 432 000 т отходов фосфогипса. В случае запуска предлагаемой технологии будет возможно производить 305 000 т вяжущих и стройматериалов на их основе. В том числе перегордочные плиты пазогребневой конструкции, гипсоволокнистые подоконные доски, декоративные звукопоглощающие элементы и мраморовидные плиты.

### **Создание производства по переработке фосфогипса и его экономическое обоснование**

Цель: создание высокотехнологичного экологически чистого производства по переработке отвалов фосфогипса с целью извлечения редкоземельных элементов и получения чистого гипса.

Главное преимущество при реализации проекта и эксплуатации производства:

- переработка техногенных месторождений предполагает налоговые льготы и должна обеспечиваться поддержкой государства (специальный правовой режим);
- замещение импорта редкоземельных элементов и возможность экспорта гипсовых компонентов.

Инвестиционная обеспеченность: имеются фактически неограниченные запасы сырья; существует устойчивый рынок сбыта солей и чистых редкоземельных элементов; имеется стабильно потребляющий рынок сбыта гипса, вяжущих и т.д.; существуют научно обоснованные и отработанные на практике технологии переработки фосфогипса.

Экологическая составляющая: улучшение экологической ситуации в зоне наличия отвалов фосфогипса.

Суммарные инвестиции на реализацию проекта:

- проектирование, строительство и организация производства – 10 млн. \$;
- современное оборудование производства – 20 млн. \$.

Срок реализации и окупаемость проекта: срок реализации – 2 года; срок окупаемости – 4 года. Инвестиционный капитал – долевое участие.

Расчетные цифры даны по аналогии с инвестиционными проектами по переработке фосфогипса на гипсовое вяжущее тонкого помола на примере Гомельского химического завода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта ЕСОРНОС, контракт № INCO-СТ-2005-013359.

### Литература

1. Гидрометаллургическая переработка фосфогипса на сульфат натрия, карбонат кальция, соединения редкоземельных элементов и углекислый стронций / Конкурс русских инноваций.– 2005–2006 г.
2. Кто освоит редкоземельный Клондайк? // Химия и Бизнес, 2004 г.
3. Ольгинский А.Г., Крайнюк Е.В. Экономически эффективная переработка фосфогипса – отхода производства минеральных удобрений / 1 я Межд. конф. «Сотрудничество для решения проблемы отходов», Харьков, 5–6 февраля 2006 г.

4. Эрайзер Л.Н., Горнев В.А., Косс Т.В. Разработка способа переработки фосфогипса в полезные продукты / Труды ОГПУ, 1998.– №1.– С. 32–36.
5. Фосфогипс и его использование / Под ред. С.Д. Эвенчика, А.А. Новикова. – М.: Химия, 1990.– 449 с.
6. Исследование процесса конверсии фосфогипса в сульфат аммония /В.Н. Ламп, Т.Ф. Абашкина, Н.М. Бризицкая и др. // Реф. информация НИУИФа "Промышленность минеральных удобрений и серной кислоты". Вып. 247. –М.:НИИТЭХИМ, 1983.–С.8–11.
7. Русин Н.Ф., Дейнека Г.Ф., Зинченко Т.А. Содержание оксида стронция в продукте прокаливания технического карбоната кальция, полученного из фосфогипса // Комплексное использование минерального сырья. – 1978. – №6. – С. 26–29.
8. Влияние примесей стронция, железа, алюминия, титана и кремния на степень конверсии сульфата кальция / Н.Ф. Русин, Ф.Г. Бабих, Г.Ф. Дейнека, В.Е. Поладян // Журнал прикл. химии. – 1979. – 52. – № 10. – С. 83–86.
9. Локшин Э.П., Калинин В.Г. Физико-химическое обоснование и разработка экономически целесообразной технологии извлечения лантаноидов из фосфополугидрата // ИХТРСМС КНЦ РАН.– 9 с.
10. Влияние основных параметров процесса на эффективность выщелачивания РЗЭ из фосфогипса серной кислотой / А.М. Андрианов, Н.Ф. Русин, Л.М. Буртненко, В.Д. Федоренко, М.К. Ольмезов // Журнал прикладной химии, 1976.– т.49.– №3.– С. 636–638.
11. Извлечение редкоземельных элементов из фосфогипса серной кислотой / Воробьев Н.И. и др. // Весці АН Беларусі. Сер. хим. наук, 1998. – № 2. – С. 103–106.

Bibliography (transliterated)

1. Gidrometallurgicheskaya pererabotka fosfogipsa na sulfat natriya, karbonat kaltsiya, soedineniya redkozemelnyih elementov i uglekislyiy strontsiy Konkurs russkih innovatsiy.– 2005–2006 g.
2. Kto osvoit redkozemelnyiy Klondayk? Himiya i Biznes, 2004 g.
3. Olginskiy A.G., Kraynyuk E.V. Ekonomicheskii effektivnaya pererabotka fosfogipsa – othoda proizvodstva mineralnyih udobreniy 1 ya Mezhd. konf. «Sotrudnichestvo dlya resheniya problemy othodov», Harkov, 5–6 fevralya 2006 g.
4. Erayzer L.N., Gornev V.A., Koss T.V. Razrabotka sposoba pererabotki fosfogipsa v poleznyie produkty Trudy OGPU, 1998.– #1.– p. 32–36.
5. Fosfogips i ego ispolzovanie Pod ped. S.D. Evenchika, A.A. Novikova. – М.: Himiya, 1990.– 449 p.
6. Issledovanie protsessa konversii fosfogipsa v sulfat ammoniya V.N. Lamp, T.F. Abashkina, N.M. Brizitskaya i dr. Ref. informatsiya NIUIFa "Prpomysishlennost minepalnyih udobreniy i sepnoy kislotyi". Vyip. 247. –М.:НИИТЕХИМ, 1983.–p.8–11.
7. Rusin N.F., Deyneka G.F., Zinchenko T.A. Soderzhanie oksida strontsiya v produkte prokalivaniya tehničeskogo karbonata kaltsiya, poluchennogo iz fosfogipsa Kompleksnoe ispolzovanie minepalnogo syipya. – 1978. – #6. – p. 26–29.
8. Vliyanie primesey strontsiya, zheleza, alyuminiya, titana i kremniya na stepen konversii sulfata kaltsiya N.F. Rusin, F.G. Babih, G.F. Deyneka, V.E. Poladyan Zhurnal prikl. himii. – 1979. – 52. – # 10. – p. 83–86.
9. Lokshin E.P., Kalinnikov V.G. Fiziko-himicheskoe obosnovanie i razrabotka ekonomicheskii tselesoobraznoy tehnologii izvlecheniya lantanoidov iz fosfopolugidrata IHTRSMS KNTs RAN.– 9 p.

10. Vliyanie osnovnyih parametrov protsessa na effektivnost vyischelachivaniya RZE iz fosfogipsa sernoy kislotoy / A.M. Andrianov, N.F. Rusin, L.M. Burtnenko, V.D. Fedorenko, M.K. Olmezov // Zhurnal prikladnoy himii, 1976.– t.49.– #3.– S. 636–638.

11. Izvlechenie redkozemelnyih elementov iz fosfogipsa sernoy kislotoy / Vo-robev N.I. i dr. // Vestsy AN Belarusi. Ser. him. nauk, 1998. – # 2. – S. 103–106.

УДК 661.842.532+668.8

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Хавін Г.Л.

### **КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРОБКА ФОСФОГІПСУ ІЗ ЗДОБУВАННЯМ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Розглянуто проблему комплексної переробки відходу виробництва екстракційної фосфорної кислоти – фосфогіпсу. Надано, що промислове освоєння відвалів фосфогіпсу є по суті розробка техногенного родовища, яке поперед усього, потребує здобуття рідкоземельних елементів. Останні знаходять великий попит у різних галузях промисловості і мають велику ринкову вартість. Все це у теперішній час робить дуже привабливим переробку сховищ фосфогіпсу із здобуттям рідкоземельних елементів як з фінансової, так і з екологічної точки зору.

УДК 623.526.7

Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ТАНКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СРАВНЕНИЯ ПО СТЕПЕНИ РАЦИОНАЛЬНОСТИ**

Парк бронетехники Сухопутных Войск (СВ) Вооруженных Сил (ВС) Украины, как впрочем, и других стран, составляют машины последнего и предыдущего поколений. К первым следует отнести основные боевые танки БМ «Оплот» (Т-84); БМ «Булат» (модернизированный танк Т-64), ко вторым относятся Т-64Б и Т-64А. В условиях постоянного совершенствования ВС Украины вообще, и численности танков, в частности задача оценки военно-технического уровня имеющихся и прогнозирование объема перспективных машин имеет непреходящее значение для обоснованного принятия решений о снятии с хранения, утилизации, сокращения, модернизации или переоснащения образцов и определении потребности и типажа вновь создаваемых машин.

Здесь уместно подчеркнуть, что для производства современных танков в Украине имеется в достаточно большой степени реализованный научно-технический, проектно-конструкторский и производственно-технологический потенциал, позволяющий воплотить «в металле» замысел конструктора.

Учитывая непрерывно возрастающие и изменяющиеся требования к этой категории машин, обусловленные расширением спектра задач и условий применения, возникает задача оценки соответствия тактико-технических характеристик (ТТХ) современным требованиям и разработки мероприятий для доведения их до современных показателей и принципиального решения вопроса о такой возможности вообще.

Учитывая это, а также имеющийся спрос на мировом рынке вооружений на бронетехнику, результаты комплексного теоретического и экспериментального исследования по разработке регулярного подхода и глубокому иерархическому анализу объекта бронетехники, как сложной технической системы, формированию на основе результатов этого анализа и экспертных данных, требований к тактико-техническим характеристикам перспективных образцов, были применены к образцам бронетанковой техники (БТТ), находящимся на вооружении ВС Украины и машинам иностранного производства. При этом решались следующие задачи:

- определение сравнительного технического уровня образцов;
- анализ соответствия современным и перспективным требованиям как машины в целом, так и отдельных подсистем;
- выявление резервов для проведения модернизации и оценки продолжительности существования этих резервов;
- определение перспективных направлений в разработке бронетехники отечественного производства, в том числе связанных с проблемными научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими разработками;
- оценка перспектив отечественных изделий бронетехники на мировом рынке вооружений.

Эти задачи решались на основе и с использованием разработанных подходов, метода сравнения по степени рациональности, комплексных показателей, а также результатов моделирования, экспериментальных исследований, в том числе на объектах БТТ и результатов эвристической экспертизы

Для осуществления разработанного подхода и применения метода сравнения для БТТ на основе данных о рациональных значениях ТТХ по единичным базовым показателям были определены рациональные удельные и комплексные показатели. Для автоматизации вычислений, унификации представления исходных данных и результатов анализа разработана и внедрена в КП ХКБМ система анализа показателей боевых машин «САП-БМ», которая включает базы данных ТТХ объектов бронетанковой техники (ОБТ) и других БТТ как отечественной, так и зарубежной разработки, а также расчетно-аналитический модуль.

База данных для каждого образца ОБТ включает более 200 базовых единичных и удельных показателей ТТХ. На их основе рассчитываются комплексные показатели, после чего осуществляется построение диаграмм и заполнение таблиц отражающих показатели рациональности каждого образца по 21 единичному показателю танков (рис. 1–10 и 15–22), которые включали в себя:

- 1 Масса
- 2 Высота
- 3 Ширина
- 4 Длина корпуса
- 5 Дорожный просвет
- 6 Мощность двигателя
- 7 Экипаж
- 8 Пушка, калибр
- 9 Пулемет, калибр
- 10 Гранатомет, калибр
- 11 Танковая управляемая ракета (ТУР)
- 12 Боекомплект
- 13 Бронепробиваемость БПС,  $\alpha=60^\circ$  D=2 км
- 14 Время подготовки 1-го выстрела
- 15 Дальность действительной стрельбы, км (при  $P_{БПС}=0,55$ )
- 16 Дальность действительной стрельбы, км (при  $P_{КС}=0,55$ )
- 17 Максимальная скорость ( $V_{max}$ )
- 18 Средняя скорость по проселочной дороге ( $V_{cp}$ )
- 19 Запас хода по шоссе
- 20 Запас хода по грунтовой дороге
- 21 Глубина брода

Диаграммы сравнения по степени рациональности по единичным показателям всех анализируемых образцов (рис. 11, 23), по единичным удельным показателям для каждого образца (рис. 12 и 24), и по рациональности сравниваемых образцов по удельным показателям (рис. 13 и 25), и, наконец, сравнение по интегральному показателю, включающему как 21 количественный показатель, так и 18 качественных характеристик каждого объекта, представлены на рис. 14 и 26. 18 качественных показателей учитывали наличие следующих систем и комплексов:

- 1 Автомат заряджання (1)
- 2 Система автоматического сопровождения целей (1)
- 3 Система встроенного контроля выверки прицела с пушкой (0,5) или система учета изгиба ствола (1)
- 4 Система автоматической разведки целей в оптическом (0,5), ИК (0,75), радиотехническом (1) диапазонах
- 5 Интегральная цифровая система управления и контроля компонентами комплекса вооружения (1)
- 6 Навигационная система (0,5), помехо-защищенные цифровые средства связи (0,75), автоматизированная система управления боем подразделения тактического звена (1)
- 7 Активная защита (1)
- 8 Система коллективной защиты от оружия массового поражения (1)
- 9 Система противопожарного оборудования (1)
- 10 Конструктивные мероприятия, повышающие живучесть при боевых повреждениях (1)
- 11 Термодымовая аппаратура (1)
- 12 Система регистрации лазерного (0,5) и радиотехнического облучения (1)
- 13 Система постановки защитного экрана (облака) в оптическом (0,5), ИК (0,75) и радиотехническом диапазонах (1)
- 14 Система (ы) создания помех или ложных целей в оптическом (0,5), ИК (0,75) и радиотехническом диапазонах (1)
- 15 Маскировочные сети в оптическом (0,5), ИК (0,75) и радиотехническом диапазонах (1)
- 16 Интегральная цифровая система управления и контроля составных частей силовой установки, трансмиссии, ходовой части (0,5), в том числе с места командира (1)
- 17 Автоматизированная система управления натяжением гусеничных лент (1)
- 18 Автоматизированная система управления параметрами подвески (1)

Следует отметить, что как базы данных, так и расчетно-аналитический модуль являются открытыми системами, и позволяют расширяться как по числу образцов, так и по количеству показателей ТТХ при выявлении новых свойств объектов БТТ.

Автоматизация вычислений позволяет проводить анализ в диалоговом режиме путем варьирования показателей и анализа влияния этих вариаций как на базовые единичные показатели, так и на удельные, комплексные и интегральные, что позволяет проследить изменения на иерархических уровнях сложной технической системы и тем самым учесть прямые и обратные связи между элементами и подсистемами.

В соответствии с имеющимися на вооружении и базах хранения в ВС Украины объектами БТТ для анализа использовались ТТХ следующих танков: Т-55; Т-62; Т-72Б; Т-80Б; Т-80У; Т-80УД; Т-64Б; БМ «Булат» и БМ «Оплот», а также Т-90 (Россия).



Рисунок 1 – Показатели рациональности танка Т-55



Рисунок 2 – Показатели рациональности танка Т-62



Рисунок 3 – Показатели рациональности танка Т-72Б



Рисунок 4 – Показатели рациональности танка Т-80Б



Рисунок 5 – Показатели рациональности танка Т-80У



Рисунок 6 – Показатели рациональности танка Т-80УД



Рисунок 7 – Показатели рациональности танка Т-90



Рисунок 8 – Показатели рациональности танка Т-64Б



Рисунок 9 – Показатели рациональности танка БМ «Булат»



Рисунок 10 – Показатели рациональности танка БМ «Оплот»

Для ОБТ рациональные расчетные значения удельных показателей:

- среднее удельное давление на грунт ..... 0,78÷1,07 кгс/см<sup>2</sup>;
- удельная мощность ..... 18,1÷30,0 л.с./т;
- отношение поворотливости ..... 1,51÷1,88.

Анализ показателей рациональности танков по единичным базовым показателям показывает, что все рассматриваемые образцы машин характеризуются наличием резерва по массе и высоте, за исключением танка Т-80Б, имеется резерв, или, по крайней мере, соответствие рациональному показателю по количеству выстрелов в возимом боекомплекте.

Наименьшие значения имеют показатели, отражающие количество мортир для метания гранат (п. 10 количественных показателей). Кроме этого танки БМ «Оплот», БМ «Булат», Т-80У; Т-80УД характеризуются существенным резервом по защищенности. Следует особо подчеркнуть, что сравнительно высокие показатели танка Т-64Б и наличие резервов по массе, габаритным размерам и другим показателям послужило основанием для принятия решения об этой машине – как базовой для модернизации танкового парка СВ ВС Украины. Успешность мероприятий по модернизации хорошо прослеживается сопоставлением данных по БМ «Булат» и Т-64Б.

Как видно, замена двигателя 5ТДФ на 850-сильный 5ТДФМ ликвидировало отставание по показателю мощности, при этом масса машины возросла настолько, что удельная мощность повысилась до 18,7 л.с./т, при практически неизменном значении среднего удельного давления на грунт (рис. 9). В целом следует подчеркнуть, что степень рациональности по удельным показателям БМ «Булат» превосходит прототип Т-64Б ~в 1,15 раза.

Однако, критически оценивая результаты сравнения по удельным показателям, следует особо подчеркнуть, что они приводятся для показателей характеризующих подвижность. Это связано с объективной ситуацией, заключающейся в том, что не имеется данных о других удельных показателях машин или они отрывочны, а порой не только противоречивы, но и взаимно исключают. Однако, такие показатели существуют и кроме существующих могут быть разработаны новые. Так, полезными для оценки и сравнения конструктивно-компоновочных решений могут быть показатели соотношения объема моторно-трансмиссионного отделения (МТО) и боевого отделения (БО), высоты машины и клиренса, отношения массы корпуса и башни (для танка Leklerk –  $M_k = 36,1$  т;  $M_B = 18,5$ ;  $M_{B/K} = 0,512$ ).

Естественно, что введение таких показателей не может быть осуществлено сразу, поскольку такая мера может внести известную путаницу, связанную с неидентичностью условий проведения испытаний. Поэтому, на современном этапе необходимо признать несовершенство информационной базы ТТХ степени сложности объектов БТТ – как технических систем. По-видимому разработка нормативной базы для таких показателей и разработка таковых могут и должны стать одним из направлений дальнейших исследований.

В целом, анализируя показатели машин по интегральному показателю (рис. 14) следует подчеркнуть рост вклада качественных показателей. Что особенно четко прослеживается на машинах 3-го поколения современного этапа.

При этом, отметим, что танки БМ «Булат» и БМ «Оплот» характеризуются наилучшими относительными показателями среди отечественных машин.



Рисунок 11 – Сравнение по степени рациональности

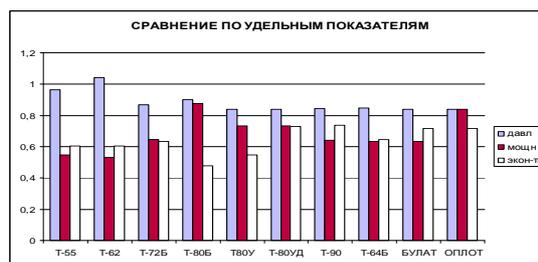


Рисунок 12 – Сравнение по удельным показателям



Рисунок 13 – Рациональность по удельным показателям



Рисунок 14 – Сравнение по интегральному показателю

Кроме танков отечественной разработки анализ был применен и к зарубежным танкам. Результаты этого анализа представлены в виде диаграммы на рис. 15–26. Как видно из приведенных данных, танки третьего поколения зарубежной разработки характеризуются существенно большими массой и габаритами, даже по отношению к современным требованиям к этим показателям. Следует отметить, что показатели танка Т-64Б и «Чифтен» примерно одинаковы, что соответствует одному и тому же этапу технического уровня развития бронетанковой техники. В целом, результаты анализа зарубежных образцов по комплексному показателю также показывают неуклонное возрастание вклада качественных показателей.



Рисунок 15 – Показатели рациональности М48А5



Рисунок 16 – Показатели рациональности М60А1



Рисунок 17 – Показатели рациональности «Леопард 1А4»



Рисунок 18 – Показатели рациональности «Чифтен Мк5»



Рисунок 19 – Показатели рациональности «Челленджер 1»



Рисунок 20 – Показатели рациональности АМХ 30



Рисунок 21 – Показатели рациональности «Абрамс А1М1»



Рисунок 22 – Показатели рациональности «Леопард 2А4»

Критически оценивая результаты сравнения, следует отметить, что относительно низкий показатель степени рациональности основного вооружения для рациональности основного вооружения для 120-мм пушки не вполне объективно отражает ситуацию.

К сожалению, в доступных источниках не было обнаружено данных о баллистических характеристиках 120-мм гладкоствольной пушки в таком объеме как для боеприпасов к пушке Д-81.



Рисунок 23 – Сравнение по степени рациональности

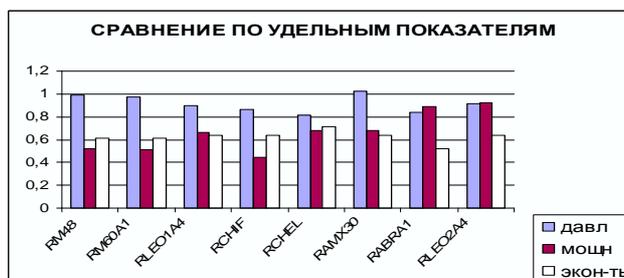


Рисунок 24 – Сравнение по удельным показателям

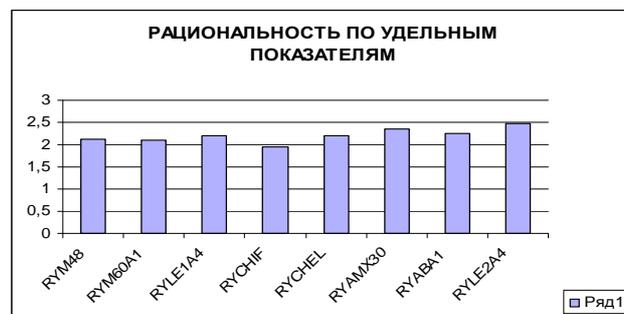


Рисунок 25 – Рациональность по удельным показателям

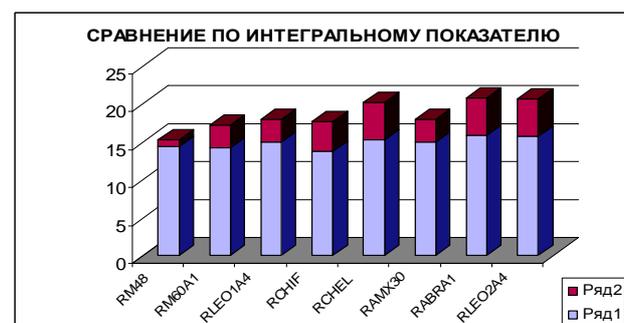


Рисунок 26 – Сравнение по интегральному показателю

Решение задачи основного вооружения для отечественных танков возможно на основе интеграции с зарубежными партнерами [3], тем более, что положительные результаты от использования 120-мм пушки на отечественных танках в КП ХКБМ им. А.А. Морозова имеются – танк «Ятаган» [1]. Стрельбовые испытания показали меньшее рассеивание импортных снарядов как при стрельбе сходу, так и с места.

В тоже время в Великобритании разработана и испытана пушка 105SB калибром 105 мм, которая характеризуется рассеиванием 0,15x0,15 т.д., и баллистическими показателями и бронепробиваемостью аналогичной 120-мм пушке. При этом используются всего два типа боеприпаса – осколочно-фугасный и бронебойный оперенный кинетического действия.

В целом, следует подчеркнуть, что любое сравнение носит относительный характер. Поэтому, рассматривая танк как сложную техническую систему, следует определить его место в общей боевой системе сухопутных войск. В этой связи на передний план выступает качественное свойство – интегрирование в информационно-управляющую боевую систему с единым информационным пространством. Это, в свою очередь, приводит к осознанию того, что танк как человекоуправляемая сложная система еще больше усложняется в виду того, что между оператором и машиной появляется еще одна система – информационно-управляющая, причем пронизывающая все уровни – от тактического до стратегического. В этом смысле танк является интегрируемым элементом такой системы. Для осуществления интеграции все элементы должны быть взаимосвязаны информационно, что требует универсальности технических средств и специального военного программного обеспечения (ВПО).

На зарубежных образцах бронетехники, таких как «Леклерк», «Абрамс М1А2», «Челенджер Mk2» выполнена такого рода интеграция. Следует подчеркнуть, что работы по разработке боевой системы будущего (FCS) были начаты в США в 1996 г., но лишь к 2000 году сформулировано техническое задание (ТЗ) на концептуальную разработку. И, тем не менее, именно концептуальные представления о такой системе позволяют конкретизировать требования к составляющим ее элементам, в том числе и танку.

Прежде всего, для интеграции в такую систему танк необходимо оборудовать комплексом датчиков и сенсорных устройств:

1. Оптических, тепловизионных, радиолокационных миллиметрового диапазона для автоматического обнаружения и сопровождения наземных и воздушных целей;
2. Внешних условий, как-то химического и радиационного фонов, контроля климатических условий, предупреждения о ракетной атаке, лазерной и РЛ подсветке;
3. Внутренние – техническое состояние машины и вооружения; физическое состояние экипажа.

Функционирование этого оборудования предполагает наличие прямой и обратной связи как по вертикали, так и по горизонтали, что и может быть осуществлено путем применения ВПО со следующей структурой:

1. Единая картина тактической обстановки;
2. Интеллектуальная связь;
3. Высокотехнологичное вооружение;
4. Защита и оборона нового поколения;
5. Навигационная система.

Применение такой системы предполагает не только рационализацию вооружения танка, но и изменение подхода к его защищенности путем снижения роли пассивной защиты и обеспечением защищенности путем повышения скрытности, уменьшения

демаскируючих факторов, предупреждения и срыва обнаружения и целеуказания, предупреждения и уничтожения боеприпасов на подлете к танку.

Кроме того, не последняя роль в такой системе должна отводиться автоматическим и роботизированным комплексам для уменьшения числа операторов, находящихся непосредственно в зоне боевых действий.

К сожалению, модернизируемые образцы отечественной бронетехники не предполагают мероприятий по адаптации и интеграции в танке подобной системы – и прежде всего потому, что в ВС Украины такая система на данном этапе не запланирована. Все это ведет к тому, что существующие образцы танков, в том числе и модернизируемые, в будущем в первую очередь должны стать платформой для информационно-интеллектуальной системы. Таким образом поменяется общее представление и о танке, как о сложной технической системе, которая состоит уже не из трех основных систем (средство подвижности, защиты и комплекса вооружения), а из четырех – средство подвижности, защиты информационно-интеллектуальный комплекс, комплекс вооружения.

#### Литература

1. Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова / Под ред. М.Д. Борисюка. – Харьков, 2007 – 188 с.
2. Анипко О.Б. Рациональные теплообменники поверхности. Х.: ХВУ, 1998 – 136 с.
3. Бусяк Ю.М., Анипко О.Б., Заозерский В.В. От конкуренции – к интеграции: перспективные направления сотрудничества со странами НАТО в области бронетанковых и артиллерийских систем вооружения // Зб. наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Харків. –2006 – Випуск 2 (8). – С. 37–38.
4. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М., Рикунів О.Н. Аанализ изменения приоритетов легких боевых и колесных гусеничных машин // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків, НТУ «ХПІ» – 2007 – №3 – С. 51–65
5. Бусяк Ю.М. О формировании рациональных показателей тактико-технических характеристик объекта бронетехники экспертным путем // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків, НТУ «ХПІ» – 2007 – №4 – С. 38–47
6. Анипко О.Б., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Метод сравнения транспортных теплообменных аппаратов по степени рациональности // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків, НТУ «ХПІ» – 1999 – №1 – С. 3–7

#### Bibliography (transliterated)

1. Harkovskoe konstruktorskoe byuro po mashinostroeniyu im. A.A. Morozova Pod red. M.D. Borisyuka. – Harkov, 2007 – 188 p.
2. Anipko O.B. Ratsionalnyie teploobmenniki poverhnosti. H.: HVU, 1998 – 136 p.
3. Busyak Yu.M., Anipko O.B., Zaozerskiy V.V. Ot konkurentsii – k integratsii: perspektivnyie napravleniya sotrudnichestva so stranami NATO v oblasti bronetankovyih i artilleriyskikh sistem vooruzheniya Zb. naukovih prats Harkivskogo universitetu Povitryanih Sil. Harkiv. –2006 – Vipusk 2 (8). – p. 37–38.
4. Anipko O.B., Busyak Yu.M., Rikunov O.N. Aanaliz izmeneniya prioritetov legkih boevyih i kolesnyih gusenichnyih mashin Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv, NTU «HPI» – 2007 – #3 – p. 51–65

5. Busyak Yu.M. O formirovaniі ratsionalnyih pokazateley taktiko-tehnicheskikh harakteristik ob'ekta bronetehniki ekspertnyim putem Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv, NTU «HPI» – 2007 – #4 – p. 38–47

6. Anipko O.B., Tovazhnyanskiy L.L. Metod sravneniya transportnyih teploobmennyih apparatov po stepeni ratsionalnosti Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv, NTU «HPI» – 1999 – #1 – p. 3–7

УДК 623.526.7

Аніпко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М.

### **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІТЧИЗНЯНИХ ТА ЗАРУБІЖНИХ ТАНКІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПОРІВНЯННЯ ЗА СТУПЕНЕМ РАЦІОНАЛЬНОСТІ**

У статті наведено порівняльний аналіз різних зразків вітчизняних та зарубіжних танків на основі методу порівняння за ступенем раціональності, комплексних показників, а також результатів моделювання, експериментальних досліджень, в тому числі на об'єктах бронетанкової техніки і результатів евристичної експертизи.

УДК 623.526.7

Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Бусяк Ю.М., Канищев С.П., Переход А.Н.

### О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ НА ЖИВУЧЕСТЬ ТАНКОВОГО ВООРУЖЕНИЯ

Ствол, как элемент ствольной системы, следует относить к изнашиваемым конструкциям, то есть таким, которые в процессе эксплуатации и применения по назначению накапливают изменения, которые до определенного уровня не оказывают допустимые изменения показателей внешней баллистики, или могут быть компенсированы конструктивно либо методически. К таким изменениям относят разгар ствола или эрозийный износ, его механический износ и омеднение.

Разгар ствола связан с двумя процессами тепловыделения при выстреле – трением ведущего пояска снаряда о поверхность канала ствола и горением пороха. В совокупности это приводит к нагреву внутренней поверхности ствола до температуры 1000–1500 °С и более. Ввиду различной продолжительности этих процессов и их интенсивности, нагрев ствола по длине также неравномерен и характеризуется наибольшими значениями в начале ствола и меньшими у дульного среза. Механизм этого вида повреждений связан с существенными изменениями механических свойств сталей при нагреве их до высоких температур. Причем, относительно стабильными эти свойства можно считать до достижения температурой величины 300–400 °С, после чего начинается резкое снижение как предела текучести, так и твердости (рис. 1) [2]

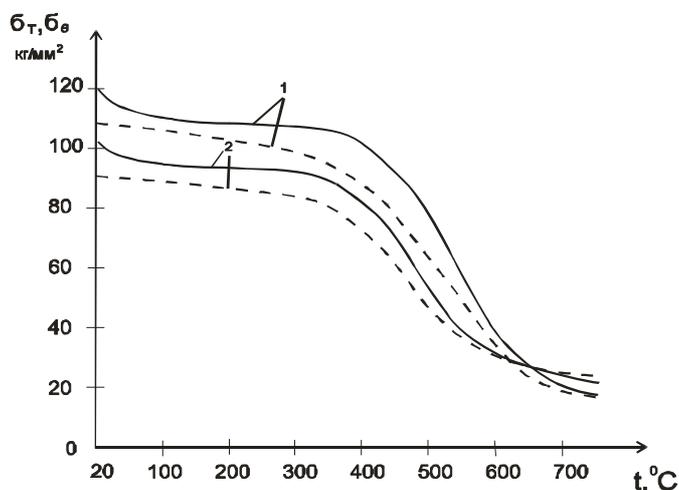


Рисунок 1 – Зависимость  $b_t$  (--) и  $b_v$  (-) от температуры: 1 – 35 ХН1М; 2 – 35 ХЗВА

Это приводит к вырыванию и уносу частиц металла, что и составляет эрозийный износ или разгар ствола.

Механический износ связан с трением ведущего пояска о поверхность канала ствола.

Совокупное действие этих процессов вдоль канала ствола различно, что позволяет выделять три основные зоны [1,3]. Первая из них – на входе в калиберную часть ствола, и составляет примерно 1/3 длины. Здесь наблюдается наибольший износ, связанный с эрозийными процессами, которые в этой части ствола наиболее интенсивны

в результате высоких температуры и давления. Поверхность металла из гладкой превращается сначала в матовую, а затем в шероховатую, которая впоследствии испещряется мелкими трещинками и канальцами. Появляется так называемая «сетка разгара». В нагаре, остающемся в трещинках «сетки разгара», содержится 15...20 % растворимых в воде солей, которые поглощают влагу из воздуха и образуют коррозионно-активные растворы, вызывающие разрушение металла ствола. Скорость эрозионного процесса значительно возрастает в местах отложения меди, так как здесь возникают гальванические пары, которые находятся в электролите – растворе солей. Средняя часть ствола составляет вторую зону и характеризуется меньшим эрозионным износом, но большим механическим износом и отложением меди. В третьей зоне наблюдается уменьшение износа ввиду снижения давления и температуры пороховых газов. Практически износ дульной части ствола только механический – от трения ведущих элементов снарядов. Характерное изменение диаметрального износа калиберной части ствола представлено на рис. 2. В отечественных танковых пушках 2А46, 2А46М [6] применяются выстрелы раздельного заряжания, поэтому представляет интерес анализ влияния изменений, вызванных износом ствола, на параметры внутренней баллистики [4].

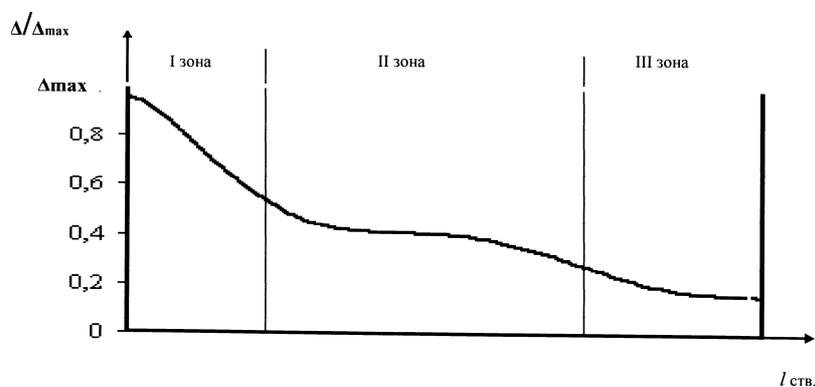


Рисунок 2 – Характер износа канала ствола

При заряджании, в виду разгара, снаряд при досылании займёт положение глубже, чем в новом стволе. Это увеличит объём камеры, и, кроме того, уменьшит путь снаряда по стволу и уменьшит коэффициент уширения камеры. Совокупное действие этих факторов приводит к уменьшению начальной скорости снаряда ( $V_0$ ) и максимального значения давления ( $P_{max}$ ), что для кондиционных боеприпасов и нарезных ствольных систем достаточно хорошо изучено в работах Д. Корнера [1], Ю.В. Чуева [3].

Кроме этого, износ ствола вообще вызывает ухудшение обтюрации, прорыв пороховых газов, что уменьшает полезную работу и приводит также к уменьшению начальной скорости и максимального давления. С другой стороны, износ ствола вызывает изменение коэффициента трения ведущих частей снаряда о поверхность канала ствола, что также влияет на изменение функций давления  $P(x)$  и скорости  $V(x)$ , и в конечном итоге уменьшает начальную скорость из-за увеличения второстепенной работы. Установлено [3], что при прочих равных условиях уменьшение начальной скорости и максимального давления у орудий раздельного заряжания значительно больше, чем у орудий с унитарным патроном, что приводит к тому, что критерием предела живучести ствола является падение начальной скорости.

Таким образом, отличие внутрибаллистических процессов для нового и изношенного стволов можно представить в виде отклонения функций давления и скорости по длине ствола (рис. 3)

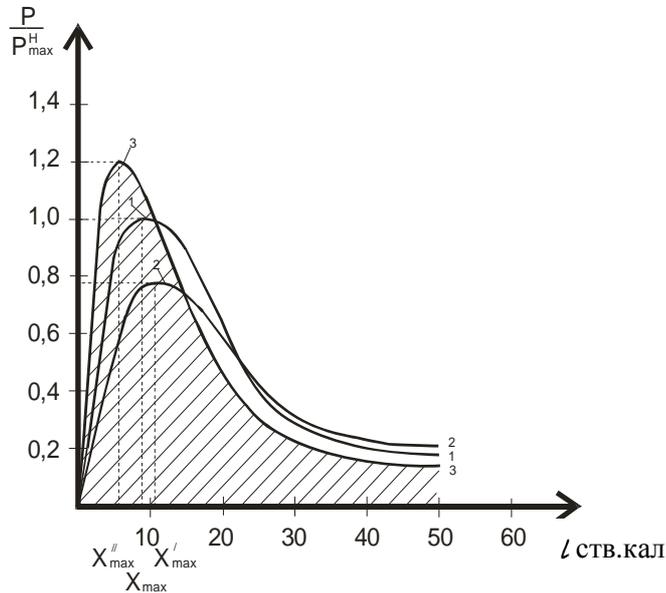


Рисунок 3 – К анализу влияния износа ствола и состояния боеприпаса на параметры внутренней баллистики:

- 1 – новый ствол, кондиционный боеприпас; 2 – ствол с разгаром, кондиционный боеприпас;
- 3 – боеприпас с пороховым зарядом длительного срока хранения

Приведенные на рис. 3 зависимости 1 и 2 отражают качественную картину изменения давления при использовании кондиционных боеприпасов.

Как показали экспериментальные исследования [7,8,9] по определению параметров внутренней баллистики для выстрелов танковой пушки с БПС, время хранения которых превышает гарантийный срок, после 14–16 лет хранения начальная скорость начинает снижаться за допустимый предел отклонения. Причем это сопровождается ростом  $P_{\max}$ , что обусловлено возрастанием скорости горения пороха. Как известно [4,5], рост  $P_{\max}$  должен приводить к возрастанию  $V_0$ . Однако, для пороховых зарядов длительного хранения это не подтверждается [8,9] из-за снижения теплотворной способности пороха, вызванного снижением содержания горючих компонентов в нём, и, в первую очередь, азота. При этом образующаяся на поверхности пороха азотная и азотистая кислоты, способствуют развитию поверхности горения, что увеличивает скорость горения пороха. Повышение скорости горения ведёт к смещению координаты  $X_{\max}$  к  $X_{\max}^II$  в сторону казенной части, горение порохового заряда заканчивается раньше, что приводит к снижению начальной скорости.

Влияние этих факторов на живучесть ствола при применении боеприпасов, сроки хранения которых превышают гарантийные, до настоящей работы не исследованы. Постановка и решение такой задачи представляются актуальными в виду того, что из-за отсутствия серийного производства боеприпасов к стрелковому и артиллерийскому вооружению в Украине, вооружение силы и другие воинские формирования используют боеприпасы, срок хранения которых в настоящее время превышает 18–20 лет.

Такая задача может быть решена с применением методов внутренней баллистики при оценке живучести стволов [3,5], определении закона трения при соответствующей

щих изменениях  $P(x)$  и значения  $V_0$  [1], а также обратной задачи внутренней баллистики [7].

Однако, для успешного решения этих задач необходимо определить зависимости между  $P_{\max}$  и  $V_0$  для зарядов, срок хранения которых превышает гарантийный.

Такая зависимость получена на основе обработки экспериментальных исследований по определению крешерного давления и начальной скорости БПС с зарядом 4Ж40 со сроками хранения более 10 лет, которые выполнялись на испытательной базе и с применением материальной части КП ХКБМ им. А.А. Морозова.

График зависимости, представленный на рис. 4, описывается функцией

$$\frac{P_{\max}}{P_{\max}^T} = 1.074 - 5.65 \cdot 10^{-3} \left( \left( \frac{V_0}{V_0^T} \right)^2 + \frac{V_0}{V_0^T} \right),$$

где  $P_{\max}^T$  и  $V_0^T$  – соответственно табличные значения максимального давления и начальной скорости;  $P_{\max}$ ,  $V_0$  – эти же параметры для соответствующего периода хранения.

Это выражение справедливо для сроков хранения более 10 лет, но не превышающие 30 лет.

Таким образом, полученная зависимость позволяет решить задачу оценки живучести ствола танковой пушки при применении боеприпасов, срок хранения которых превышает 10 лет, но не превосходит 30 лет.

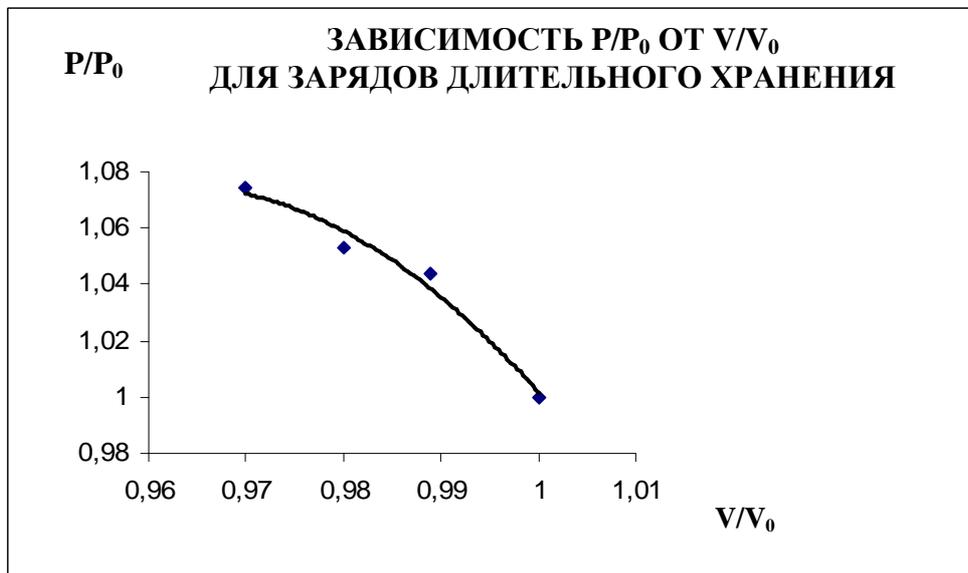


Рисунок 4

Литература

1. Корнер Дж. Внутренняя баллистика орудий М.– Иностранная литература.– 1958., 448 с.
2. Материалы машиностроения / Энциклопедический справочник, том 3, М.– Машиностроение.– 1947.– 712 с.

3. Чуев Ю.В. Проектирование ствольных комплексов. М.– Машиностроение.– 1976.– 216 с.
4. Серебряков С. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет М. Оборонгиз.– 1962.– 628 с.
5. Баллистика ствольных систем / РАРАН; В.В. Бурлов и др.– М. Машиностроение.– 2006.– 461 с.
6. Бронетанковые вооружения и техника. Оружие и технологии России XXI в. Издат. дом «Оружие и технологии». М 2003.– 783 с.
7. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М., Баулин Д.С. Обратная задача внутренней баллистики для прогнозирования свойств порохов при длительном их хранении // Интегрированные технологии и энергосбережение № 4.– 2005. С. 109–115.
8. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Баулин Д.С. Модель массопереноса при хранении пороховых зарядов с учетом изменения температуры окружающей среды \ Сб. наук. прац. ХУПС. Вип 2 (8), Харків.– 2006.– С. 50–55.
9. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Зависимость начальной скорости снаряда от максимального давления в канале ствола при выстреле зарядами с длительным сроком хранения // ИТЭ.– № 1.– 2006.– С. 83–87.

Bibliography (transliterated)

1. Korner Dzh. Vnutrennyaya ballistika orudiy M.– Inostrannaya literatura.– 1958., 448 p.
2. Materialyi mashinostroeniya Entsiklopedicheskiy spravochnik, tom 3, M.– Mashinostroenie.– 1947.– 712 p.
3. Chuev Yu.V. Proektirovanie stvolnyih kompleksov. M.– Mashinostroenie.– 1976.– 216 p.
4. Serebryakov S. Vnutrennyaya ballistika stvolnyih sistem i porohovyih raket M. Oborongiz.– 1962.– 628 p.
5. Ballistika stvolnyih sistem RARAN; V.V. Burlov i dr.– M. Mashinostroe-nie.– 2006.– 461 p.
6. Bronetankovyye vooruzheniya i tehnika. Oruzhie i tehnologii Rossii XXI v. Izdat. dom «Oruzhie i tehnologii». M 2003.– 783 p.
7. Anipko O.B., Busyak Yu.M., Baulin D.S. Obratnaya zadacha vnutrenney ballistiki dlya prognozirovaniya svoystv porohov pri dlitelnom ih hranenii Integrirrovannyye tehnologii i energosberezhenie # 4.– 2005. p. 109–115.
8. Anipko O.B., Biryukov I.Yu., Baulin D.S. Model massoperenosa pri hranenii porohovyih zaryadov s uchetom izmeneniya temperatury okruzhayuschey sredy Sb. nauk. prats. HUPS. Vip 2 (8), Harkiv.– 2006.– p. 50–55.
9. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Zavisimost nachalnoy skorosti snaryada ot maksimalnogo davleniya v kanale stvola pri vyistrele zaryadami s dlitelnyim srokom hraneniya ITE.– # 1.– 2006.– p. 83–87.

УДК 623.526.7

Аніпко О.Б., Бірюков І.Ю., Бусяк Ю.М., Канищев С.П., Переход О.М.

**ПРО ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ  
НА ЖИВУЧІСТЬ ТАНКОВОГО ОЗБРОЄННЯ**

У статті наведені фактори, впливаючи на живучість танкового озброєння та визначена залежність між максимальним тиском і початковою швидкістю для пострілів, термін зберігання яких перевищує гарантований.

УДК 621.1.016:579

Демирский А.В., Хавин Г.Л.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОЧИСТКИ САХАРНОГО СОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Экономичность производства сахара, прежде всего, определяется затратами на энергоносители и их стоимостью. В настоящее время, устаревшее оборудование большинства сахарных заводов не позволяет снизить расход топлива и, хотя бы приблизиться к европейским показателям 3,0–3,5 % условного топлива к массе переработанной свеклы. Рост цен на теплоносители и, в первую очередь, на газ предопределяет в качестве одного из главных направлений внедрение энергосберегающих способов нагрева продуктов внутри технологической цепочки получения сахара. Решение этого вопроса связано не столько с совершенствованием технологии, сколько с заменой устаревшего оборудования на новое, современное и, в первую очередь, на пластинчатое теплообменное оборудование.

Тепловые схемы большинства сахарных заводов постсоветского пространства укомплектованы кожухотрубными теплообменными аппаратами (решоверами) или в лучшем случае, скоростными секционными подогревателями, и только на отдельных заводах, и на отдельных позициях можно встретить пластинчатые подогреватели.

Несмотря на давно известные очевидные преимущества пластинчатых подогревателей [1], в качестве основных аргументов против их установки обычно выдвигалось два основных: высокая стоимость пластинчатого оборудования по сравнению с трубчатыми аппаратами и интенсивное загрязнение поверхности теплообмена (отложение накипи) в процессе эксплуатации. Далее попробуем опровергнуть это мнение.

Рассчитаем требуемую поверхность и стоимость кожухотрубного и пластинчатого аппаратов на позиции подогрева диффузионного сока конденсатом [2], исходные данные, для расчета которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета теплообменников

Теплоносители	Температура, °С		Расход, кг/ч	Потери давления, кПа
	Входная	Выходная		
Конденсат	82	65	100000	100
Сок	50	62	150000	80

В результате расчетов [2] к установке принят 10-ходовый как по соку, так и по конденсату аппарат с общим количеством труб (с наружным диаметром 33 мм) в теплообменнике 460 штук, с внутренним диаметром 1280 мм и поверхностью нагрева 160 м<sup>2</sup>. Среднеэксплуатационный коэффициент теплопередачи с учетом коэффициента использования поверхности нагрева 0,7 составляет 770 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В качестве пластинчатого аппарата на данную позицию был выбран ширококанальный аппарат производства фирмы «Альфа Лаваль» марки WG200, представленный на рис. 1.

В результате расчетов был запроектирован ширококанальный аппарат WG200 с широким каналом по стороне дефекованого сахарного сока с общей площадью теплопередачи 28,44 м<sup>2</sup> (поверхность теплообмена 26,9 м<sup>2</sup>), коэффициент теплопередачи

чистый составляет 5047 Вт/(м<sup>2</sup>·К), запас на загрязнение поверхности 21%, касательное напряжение на стенке широкого канала – 126 Па.



Рисунок 1 – Ширококанальный и спиральный теплообменники фирмы «Альфа Лаваль»

Ширококанальные аппараты выпускаются с двумя типами пластин, с односторонним широким каналом и широкими каналами по обеим сторонам, рис. 2.

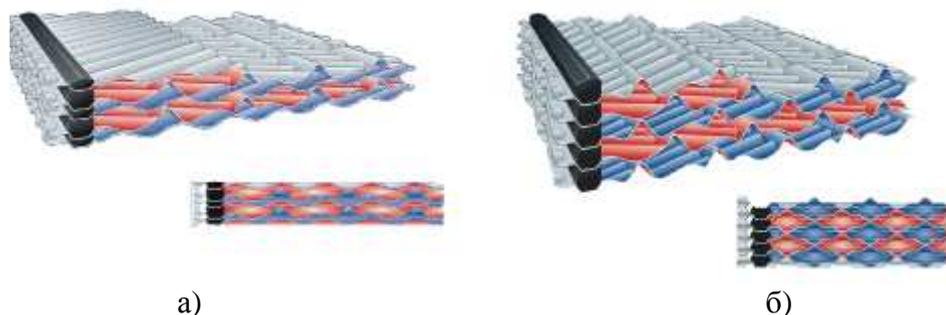


Рисунок 2 – Пакет пластин ширококанального теплообменника фирмы «Альфа Лаваль»: а) одностороннего; б) двустороннего

Будем исходить из стоимости одного квадратного метра поверхности теплообмена (удельная поверхность нагрева) для кожухотрубного аппарата (решовера) – 65 €/м<sup>2</sup>, скоростного секционного подогревателя – 180 €/м<sup>2</sup> [3]. Для пластинчатых теплообменников примем стоимость удельной поверхности в среднем по всем фирмам производителям аппаратов: традиционный разборный аппарат – 330–350 €/м<sup>2</sup> [3], ширококанальный с широким каналом по одной стороне – 500–550 €/м<sup>2</sup>, ширококанальный с широким каналом по обеим сторонам – 750–950 €/м<sup>2</sup>. Стоимость аппаратов представлена в табл. 2, где принято, что площадь поверхности теплообмена у скоростного секционного подогревателя примерно в два раза меньше, чем у обычного кожухотрубного аппарата.

Из табл. 2 можно видеть, что стоимость аппаратов примерно равна, при несомненно более высокой эффективности пластинчатых теплообменников. Преимущества пластинчатых теплообменных аппаратов состоят в следующем [1]:

- высокий коэффициент теплопередачи при минимальной поверхности нагрева;
- максимальная компактность без установки специального фундамента;

- возможность работать при малых температурных сближениях (1–4 °С);
- практически мгновенная реакция аппарата на изменение текущих условий работы за счет небольшого количества продукта в объеме аппарата);
- существует возможность быстрой переналадки пластинчатого аппарата за счет добавления пластин;

– простота в эксплуатации и обслуживании (очистка с разборкой и промывка).

На сахарных заводах таких стран как Швеция, Франция пластинчатые теплообменники полностью заменили трубчатые. При этом осуществляется подогрев и охлаждение не только двух сред, но и четырех с различными тепловыми параметрами.

Технологический процесс непосредственного получения сахара из свеклы делится на 4 этапа: получение диффузионного сока или диффузия; очистка диффузионного сока или просто очистка сока; выпаривание сока и кристаллизация сахара из выпаренного сока. Большинство установок пластинчатых теплообменников на сахарных заводах постсоветского пространства связано с установкой их в качестве подогревателей чистого сахарного сока перед выпариванием. На этой позиции нашли применение традиционные разборные пластинчатые теплообменники, которые отлично зарекомендовали себя в работе.

Менее распространенным является применение пластинчатых теплообменников в отделении очистки диффузионного сока, рис. 3. Основным сомнением к их установке служит возможность стабильной работы с загрязненными средами, такими как диффузионный сок или дефекованный сок. Однако практика эксплуатации ширококанальных аппаратов в отделении очистки показала, что они с успехом заменили трубчатые и спиральные (рис. 1). Последний тип аппаратов обычно применяется при работе со средами склонными к образованию отложений на поверхности теплообмена. Главными их недостатками являются сравнительно низкий коэффициент теплопередачи по сравнению с пластинчатыми аппаратами и высокая стоимость. Поэтому в качестве альтернативы спиральным аппаратам, например фирмой «Альфа Лаваль», были разработаны ширококанальные теплообменники.

Одной из наиболее выгодных позиций для установки пластинчатых подогревателей является их применение в качестве подогревателей дефекованного сока перед 1-й сатурацией. Нагрев производится с температуры 52 °С до 90 °С в четырех аппаратах при помощи различных теплоносителей, табл. 3.

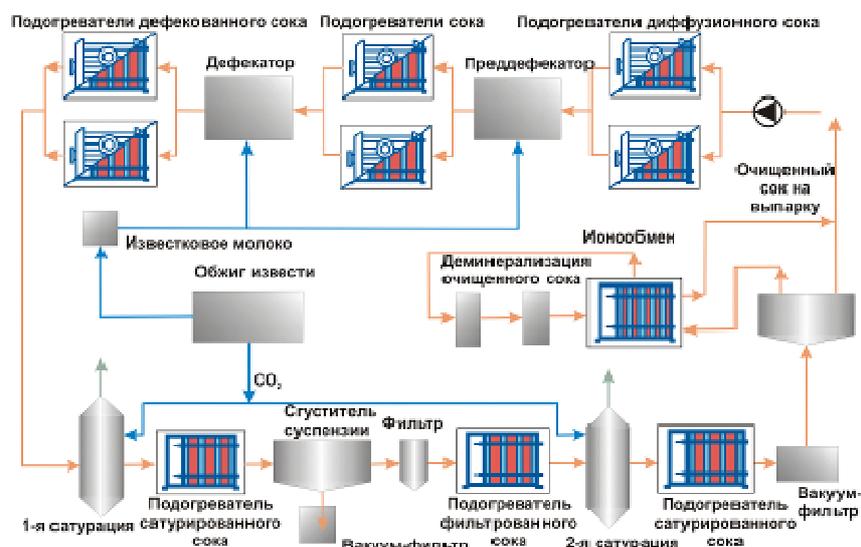


Рисунок 3 – Очистка диффузионного сока

Таблица 3 – Исходные данные для расчета пластинчатых теплообменников подогрева дефекованного сока перед первой сатурацией

Дефекованный сок с температурой 52 °С	Температура греющего теплоносителя по ступеням, °С			
	I - Конденсат 92,8 → 77,6°С	II – пар 82°С	III – пар 93,8°С	IV- пар 104,8°С
Температура, °С	52 → 62	62 → 69	69 → 81	81 → 90
Расход, м <sup>2</sup> /ч	382,0	383,9	385,1	387,3

В результате проектирования и расчетов к установке были приняты разборные ширококанальные теплообменники «Альфа Лаваль» марки МА30-SMFM представленные в табл. 4. Пластины аппаратов из нержавеющей стали AISI 316 толщиной 1 мм (теплообменник с конденсатным подогревом имеет пластины толщиной 0,8 мм) и вклееными прокладками из материала EPDM.

Таблица 4 – Типы каналов и площадь поверхности нагрева теплообменников рассчитанных для условий табл. 3

Тип канала: обычный – «N» ширококанальный – «W»	Распределение по ступеням нагрева			
	I	II	III	IV
Типы каналов в аппарате	«W» / «W»	«W» / «W»	«N» / «W»	«N» / «W»
Поверхность нагрева, м <sup>2</sup>	58,5	66,0	121,5	79,5

Установка таких аппаратов была реализована на Валуйском сахарном заводе и уже в течение 7 лет с успехом эксплуатируется. Причем чистка аппаратов производится два раза в году после работы на свекле, и после работы на сырце. До настоящего времени замена прокладок не производилась.

Другой важнейшей позицией по своей эффективности работы является установка ширококанальных теплообменников для подогрева сока после 1-й сатурации перед фильтрованием и перед 2-й сатурацией. Также ширококанальный теплообменник целесообразно и экономически выгодно использовать после котла 2-й сатурации в качестве подогревателя сатурированного сока. В технологической цепочке деминерализации очищенного сока (тонкого сока) можно использовать обычный пластинчатый аппарат. В качестве греющего теплоносителя для подогрева сока в отделении очистки диффузионного сока обычно используют вторичный пар 3-й ступени, иногда 2-й ступени.

Таблица 5 – Исходные данные для расчета теплообменника нагрева диффузионного сока утфельным паром

Теплоносители	Температура, °С		Расход, кг/ч	Потери давления, кПа
	Входная	Выходная		
Пар	65	63	5000	2
Сок	52	50	150000	100

Несомненно, важнейшей энергосберегающей позицией является утилизация утфельных паров низкого давления. Эти пары обладают высокой энтальпией, но низким температурным потенциалом (температура 65 °С). Основным способом непосредственного использования тепла утфельного пара является нагрев диффузионного сока [2].

Наиболее экономически целесообразно это применять при откачке диффузионного сока с диффузионных аппаратов шнекового типа, так как в этом случае температура диффузионного сока на выходе равна 30°C (у аппаратов колонного типа – 48 °С). Для исходных данных приведенных в табл. 5 был рассчитан теплообменник «Альфа Лаваль» марки МА30-SMFM с широкими каналами по стороне сока и пара. Теплообменник имеет площадь теплообмена 58,5 м<sup>2</sup> и коэффициент теплопередачи (чистый) – 5200 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Таким образом, при использовании такого теплообменника, работающего от тепла утфельных паров, можно полностью обеспечить нагрев диффузионного сока с температуры 30 °С до 52 °С и дефекованного сока до температуры 90 °С, как представлено в табл. 4.

#### Литература

1. Пластинчатые теплообменники в промышленности / Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2004.– 232 с.
2. Колесников В.А., Нечаев Ю.Г. Теплосиловое хозяйство сахарных заводов. – Москва: Пищевая промышленность, 1980.– 392 с.
3. Эффективный нагрев продуктов – основа совершенствования теплоиспользования на сахарных заводах / Колесников В.А., Аникеев А.Ю, Захаров С.А., Овсянников И.В. // Сахар, 2007.– №7.– С. 36–38.

#### Bibliography (transliterated)

1. Plastinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. – Harkov: NTU „HPH”, 2004.– 232 p.
2. Kolesnikov V.A., Nechaev Yu.G. Teplosilovoe hozyaystvo saharnyih zavodov. – Moskva: Pischevaya promyishlennost, 1980.– 392 p.
3. Effektivnyiy nagrev produktov – osnova sovershenstvovaniya teploispolzovaniya na saharnyih zavodah Kolesnikov V.A., Anikeev A.Yu, Zaharov S.A., Ovsyannikov I.V. Sahar, 2007.– #7.– p. 36–38.

УДК 621.1.016:579

Демірський О.В., Хавін Г.Л.

### **РЕКОНСТРУКЦІЯ ВІДДІЛЕННЯ ОЧИЩЕННЯ ЦУКРОВОГО СОКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ**

Розглянуто проблеми енергозберігаючої модернізації відділення очищення цукрового соку. Наведено, що застосування пластинчастих теплообмінників замість трубчастих, не тільки дає вигоду у економії теплової енергії, але не більш за ціною. Надані приклади розрахунків широко каналних пластинчастих теплообмінників для підігріву дефекованого соку перед першою сатурацією і розрахунок апарату для підігріву дифузійного соку утфельною парою.



УДК 678.5: 621.382-181.48

Рассоха А.Н., Черкашина А.Н.

**КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ  
В ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТАХ***Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

При получении полимерных композитов, содержащих дисперсные наполнители различного гранулометрического состава, как правило, образуются кластерные агрегаты преимущественно фрактальной структуры [1–3]. Данный эффект, вероятно, обусловлен взаимодействием частиц наполнителя, а также наличием при смешении ингредиентов системы и формировании изделий из полимерных композитов малых дивергентных потоков частиц наполнителя, способствующих формированию кластеров [4].

Известно [4], что если поток  $P$  характеризуется наличием точек  $r(xyz)$ , в которых дивергенция отлична от нуля,  $divP(xyz) \neq 0$ , то это означает возможность существования источников и стоков потока, т.е. в объеме  $\Delta V$  в окрестностях точки  $(xyz)$  может наблюдаться накопление дисперсных частиц наполнителя, приводящих к формированию кластерного агрегата. Причем кластерная система обладает динамичным характером.

Представляло интерес исследовать влияние дисперсного наполнителя на процесс кластеризации и структурно-топологические характеристики в наполненных полимерных системах.

В качестве связующего выбраны фурано-эпоксидные реакционноспособные олигомеры на основе ФАЭД-20 (20), представляющие собой продукт термомеханического совмещения фурфуролацетонового мономера марки ФАМ и эпоксидианового олигомера марки ЭД-20 в массовом соотношении 80 : 20. Наполнителями служили дисперсные системы – кварцевый песок (мука) – КП, каолин – КН, периклаз – ПК соответствующего гранулометрического состава.

Изучение процессов кластеризации кварцевого песка, каолина и периклаза в фурано-эпоксидном связующем проводили в рамках реологического подхода. Вязкость исследованных систем осуществляли на ротационном реовискозиметре «РЕОТЕСТ-2» с узлом типа «коаксиальные цилиндры».

Реологические свойства наполненных фурано-эпоксидных систем определяются отношениями термо- и гидродинамических взаимодействий.

Оценку сил, действующих между частицами наполнителя, можно охарактеризовать потенциалом Ван-дер-Ваальса, который для случая  $\Delta \ll a$  в приближении Дерягина определяется соотношением [5]:

$$W_{vdw} \approx \frac{-A_h \cdot a}{12 \cdot \delta},$$

где  $A_h$  – постоянная Гамакера;  $\delta = 2 \cdot \Delta$  – расстояние между частицами. Так как для кварцевого песка (муки), диспергированного в ФАЭД, численное значение константы Гамакера не известно, то ее оценки использовали положение теории Лифшица :

$$A_h = \frac{3}{4} \cdot kT \left( \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \right)^2 + \frac{3 \cdot h \cdot \nu \cdot (n_1^2 - n_2^2)^2}{16 \cdot \sqrt{2} \cdot (n_1^2 + n_2^2)^{3/2}},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления наполнителя и ФАЭД;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость твердой и жидкой фаз;  $\nu$  – главная частота поглощения света диоксидом кремния,  $\text{с}^{-1}$ ;  $h$  и  $k$  – постоянные Планка и Больцмана;  $T$  – температура, К.

Определено, что для частиц кварцевого песка (муки) в жидком РСО типа ФАЭД-20(20) константа Гамакера составляет  $A_h = 2,26 \cdot 10^{-20}$  Дж.

Одним из технологических приемов стабилизации системы – препятствию образования частицами наполнителя в суспензии структурных агрегатов, которые под действием силы тяжести оседают: создание на поверхности слоя из адсорбированных молекул ингредиентов ФАЭД.

Минимальная толщина такого слоя определяется условием – Ван-дер Ваальсовский потенциал должен быть преодолен энергией броуновского движения, т.е.  $W_{vdw} \langle k \cdot T \rangle$ .

Для оценки силы притяжения между частицами кварцевого песка в среде ФАЭД, используя закон силы  $F = \partial W / \partial \delta$ , получаем соотношение:

$$F_{vdw} \approx \frac{A_h \cdot a}{12 \cdot \delta^2}.$$

При течении наполненной фурано-эпоксидной композиции на частицы дисперсного наполнителя наряду с силами притяжения Ван-дер-Ваальса действуют гидродинамические силы, которые стараются оторвать в агрегатах (кластерах) частицы друг от друга. Максимальная гидродинамическая сила  $F_m$  при сдвиговом течении наполненных ФАЭД составляет:  $F_m = 6,12 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a^2 \cdot \dot{\gamma}$ .

Значение предельной скорости сдвига (деформации)  $\dot{\gamma}_{кр}$ , при которой в системе агрегаты (кластеры) частиц начинают исчезать, можно найти из условия:  $F_m \geq F_{vdw}$ . Откуда следует соотношение

$$\dot{\gamma}_{кр} = \frac{A_h}{73,44 \cdot \pi \cdot \delta^2 \cdot a^2 \cdot \eta}.$$

Для системы ФАЭД-20(20) – кварцевый песок (мука) предельная скорость сдвига  $\dot{\gamma}_{кр}$  составляет  $2056 \text{ с}^{-1}$ . Приведенный результат носит оценочный характер, так как расчет проведен для монофракционного наполнителя. Однако данный показатель хорошо коррелируется с характеристикой реальной реологической системы ( $\dot{\gamma}_{кр} = 2087 \text{ с}^{-1}$ ).

Зависимость относительного числа частиц наполнителя в кластере в исследованных связующих на основе ФАМ и ФАЭД-20(20) – оценивали в рамках реологического подхода.

Наличие структурообразующих элементов (кластеров) в ФАЭД по данным реологических исследований может быть доказано косвенным образом в результате анализа эксперимента, позволяющего доказать существование и оценить относительное число частиц наполнителя в структурообразующем элементе.

Форма кривых аналогична кривым изменения относительной вязкости растворов разветвленных полимеров и экспериментальные данные хорошо аппроксимируются с

помощью соотношения, типичного для полимерных систем:  $\ln \eta_{omni} = k \cdot \varphi_i \cdot N_i \cdot M$ , где  $k$ , – константа;  $\varphi_i$  – текущая концентрация дисперсной фазы;  $N_i$  – количество частиц наполнителя в кластере,  $M$  – средняя «молекулярная масса» частиц, составляющего кластер. При  $\varphi \rightarrow \varphi_o \approx 0$   $\ln \eta_{omni,o} \approx \varphi_o$ , что позволяет оценить относительное количество частиц наполнителя в кластере  $N$  по отношению к количеству частиц  $N_o$  при малых значениях концентраций  $\varphi_o$  по соотношению

$$\frac{N_i}{N_o} = \frac{\ln \eta_{omni}}{\varphi_i}$$

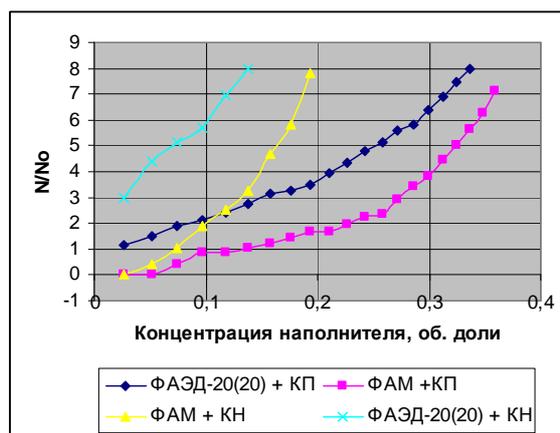


Рисунок 1 – Изменение относительного числа частиц в кластере от концентрации дисперсного наполнителя (температура 20 °С).

Как видно из приведенных данных (рис. 1) природа и концентрация дисперсного наполнителя оказывает существенное влияние на характер и скорость процесса кластеризации в ФАМ и ФАЭД-20(20). Максимальная скорость кластеризации структуры наблюдается в случае использования каолина.

Анализ экспериментальных данных (рис. 1) позволяет в общем виде выделить три участка с различной скоростью роста агрегатов. Ширина концентрационного диапазона и скорость образования кластеров определяется свойствами дисперсного наполнителя.

На первом участке наблюдается необратимая агрегация с быстрым образованием кластеров конечных размеров. Второй участок характеризуется относительно низкой скоростью роста числа частиц в кластере. При этом  $\eta_{omni}$  значительно повышается, что, вероятно, обусловлено формированием большого числа мелких агрегатов без образования перколяционного кластера. На третьем участке наблюдается интенсивный рост агрегатов, то есть имеет место кластер – кластерная агрегация, которая в итоге приводит к образованию бесконечного перколяционного кластера.

В табл. 1 представлены некоторые структурные параметры для композиций на основе ФАЭД-20(20).

Вторые производные зависимости  $A = f(\varphi)$  на различных участках имеют разные знаки (характеризуют выпуклость-вогнутость графической зависимости). Это позволяет качественно описать структуру кластеров конечных размеров.

В рассмотренных системах структура кластеров имеет преимущественно сферическую форму. Для композиции ФАМ+КП в области малых концентраций (до 13 об. %) в некоторой мере характерна линейная структура кластеров.

Таблица 1 – Структурные параметры наполненных композиций ФАЭД-20(20)

Участок	$\Delta A/\Delta \varphi$		Концентрация, %	$C_s, \%$	
	каолин	кварцевый песок		каолин	кварцевый песок
1	0,30	0,80	5,0	3,33	1,25
2	0,14	0,25	10,0	4,54	1,82
3	0,23	0,64	12,5	5,00	1,84

Примечание:  $A=N/N_0$ ,  $C_s$  – концентрация кластеров в системе, масс. %.

Увеличение температуры приводит к снижению числа частиц в кластере (табл. 2). В области температур выше 50 °С кластерные образования практически разрушаются.

Таблица 2 – Влияние температуры на структурные параметры наполненных ФАЭД-20(20)

$T, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \text{об. \%}$	$\eta_{\text{отн}}$	$N$	$C_s, \%$
20	<u>10,1</u>	<u>1,654</u>	<u>4,98</u>	<u>2,03</u>
	9,7	1,271	2,47	4,05
40	<u>10,1</u>	<u>1,264</u>	<u>2,32</u>	<u>4,45</u>
	9,7	1,139	1,34	7,24
65	<u>10,1</u>	<u>1,107</u>	<u>1,01</u>	<u>10,1</u>
	9,7	1,071	1,00	9,7

Примечание: числитель – ФАЭД-20(20)+КН, знаменатель – ФАЭД-20(20)+КП.

Некоторые структурно-топологические параметры исследованных систем представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Структурно-топологические параметры композиций на основе ФАЭД-20(20)

Наполнитель	$C_{кр}, \%$	$C < C_{кр}$			$C > C_{кр}$		
		$a$	$k$	$d_1$	$a$	$k$	$d_2$
Каолин	10,30	0,716	0,0562	1,40	0,573	0,0209	1,74
Кварцевый песок	19,95	0,638	0,0066	1,57	0,409	0,0021	2,44

Параметры, приведенные в табл. 3, характеризуются следующим образом:  $C_{кр}$  – концентрация дисперсной фазы, при которой начинается формироваться непрерывная флуктуационная сетка из индивидуальных частиц и кластеров различных размеров;  $a$  – параметр, характеризующий «рыхлость» кластеров;  $k$  – константа, зависящая от природы материала и степени взаимодействия дисперсной фазы и связующего;  $d_1, d_2$  – фрактальная размерность кластерных агрегатов при различных концентрациях дисперсной фазы.

Исходя из полученных экспериментальных данных и проведенного анализа, можно сделать вывод, что с изменением концентрации дисперсной фазы заметно изменяется и ее структура. В области низких концентраций наполнителя рост числа первичных агломератов частиц по мере повышения степени наполнения не сопровождается заметным изменением их структуры вплоть до образования контактирующими агломе-

ратами неупорядоченого просторового каркаса аналогічного вихідній структурі дисперсної фази в вільному стані.

Дальніше збільшення вмісту наповнювача супроводжується частичним руйнуванням первинних агрегатів і перестройкою сформованого ними просторового каркаса в структуру взаємодіючих індивідуальних частинок з звільненням частин іммобілізованого в агрегатах фурано-епоксидного зв'язуючого.

Відповідно зміні ступеня іммобілізації ФАЭД з ростом ступеня наповнення відношення  $\eta_o/\eta_m$  проходить через максимум, що характерно для рихлої упаковки частинок наповнювача. В області концентрацій дисперсної фази, близької до граничної ступеня наповнення, різниці між найбільшою і найменшою ньютонівською в'язкістю досліджуваних фурано-епоксидних систем незначительні.

Сопоставлення отриманих експериментальних даних свідчить про те, що найбільш схильні до структуризації каолин, в меншій мірі – периклаз і кварцевий пісок.

Таким чином, проведений комплекс досліджень з достатньою ступенню точності і достовірності дозволяє на якісному і, в певній мірі, кількісному рівні охарактеризувати процеси кластеризації досліджуваних дисперсних наповнювачів в фурано-епоксидних системах, що дає можливість прогнозувати фізико-механічні та експлуатаційні властивості наповнених фурано-епоксидних композитів і виробів на основі цих матеріалів.

#### Література

1. Шалурина Н.В., Родулгин В.М., Грямова Г.Д і др. Агрегація коллоїдних частинок в отверждающихся системах // Коллоїдний журнал.– 1994.– Т. 56, №3.– С. 451–454.
2. Патлажан С.А., Мисочко Е.Я., Снегур С.А. Особливості структурних агрегатів частинок полімерів кремнієвої кислоти в полярній і неполярній середовищах / Високомолекулярні сполучення.– 1993.– Т А35, № 12.– С. 1991–1996.
3. Высоккий В.В., Ролдугин В.И., Прямова Т.Д., Шамурина М.В. О фрактальных и перколяционных характеристиках металлонаполненных полимерных пленок // Коллоїдний журнал.– 1995.– Т.57, №3.– С. 299–303.
4. Жарнова О.А. Методи генерації кластерних систем // Тезиси доповідей XII республіканської наукової конференції аспірантів, магістрантів і студентів, – Гродно, 2004.– С. 342–343.
5. Палчевскис Э, Файтельсон Л., Якобсонс Э. Реология органодисперсий нанопорошков оксида алюминия, используемых в конструкционной керамике // Механика композитних матеріалів.– 2005.– Т. 41, № 3.– С. 373–390.

#### Bibliography (transliterated)

1. Shalurina N.V., Rodulgin V.M., Gryamova G.D i dr. Agregatsiya kolloidnykh chastits v otverzhdayushchih sistemah Kolloidnyi zhurnal.– 1994.– Т. 56, #3.– р. 451–454.
2. Patlazhan S.A., Misochko E.Ya., Snegur S.A. Osobennosti strukturnykh agregatov chastits polimerov kremnievoy kisloty v polyarnoy i nepolyarnoy sredah Vyisokomolekulyarnye soedineniya.– 1993.– Т А35, # 12.– р. 1991–1996.

3. Vyisotskiy V.V., Roldugin V.I., Pryamova T.D., Shamurina M.V. O fraktalnyih i perkolyatsionnyih harakteristikah metallonapolnennyih polimernyih plenok Kolloidnyi zhurnal.– 1995.– Т.57, #3.– p. 299–303.

4. Zharnova O.A. Metodyi generatsii klasternyih sistem Tezisyi dokladov XII respublikanskoj nauchnoy konferentsii aspirantov, magistrantov i studentov, – Grodno, 2004.– p. 342–343.

5. Palchevskis E, Faytelson L., Yakobsons E. Reologiya organodispersiy nano-poroshkov oksida alyuminiya, ispolzuemyih v konstruktsionnoy keramike Mehanika kompozitnyih materialov.– 2005.– Т. 41, # 3.– p. 373–390.

УДК 678.5: 621.382-181.48

Рассоха О.М., Черкашина Г.М.

### **КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ДИСПЕРСНОГО НАПОВНЮВАЧА В ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТАХ**

В роботі наведені теоретичні та експериментальні дані, щодо процесів кластеризації дисперсних наповнювачів (кварцовий пісок, каолін, периклаз) в фурано-епоксидних полімерах.

УДК 623.4.01

Анипко О.Б., Рикунів О.Н., Пономарєв Е.П., Маренко Г.Н.

## **К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ЛЁГКИХ КОЛЁСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ БОЕВЫХ БРОНИРОВАННЫХ МАШИН**

В течение многих лет в области бронетехники доминировали танки. На поле боя альтернативы танку, как по огневой мощи, так и по защищенности нет, и в тоже время использование легких колесных и гусеничных боевых бронированных машин (ЛК и Г ББМ) носило ограниченный характер, а вооруженные силы некоторых стран не использовали легкую бронетехнику вообще. Однако после окончания «холодной» войны, и в связи с локальными военными конфликтами за последние 10–15 лет, большое внимание стало уделяться развитию легкой бронетехники.

Анализ [1,2] свидетельствует о существенном увеличении количества производимых и модернизируемых ЛК и Г ББМ в 90-е годы и изменением структуры бронетанкового вооружения в связи с увеличением доли бронированных машин легкой категории.

Существует большое количество задач, когда применение танков не целесообразно по стоимостным оценкам:

- патрулирование района;
- борьба с незаконно-вооруженными формированиями;
- участие при ликвидации массовых волнений (эффект присутствия).

Мощным толчком в развитии легких боевых бронированных машин (ЛББМ) стало проведение миротворческих операций. Ситуация начала меняться в начале 90-х годов, когда в миротворческие операции на Балканах были вовлечены армии нескольких стран. Эти операции показали, что применение колесных бронетранспортеров (БТР) оказалось более эффективным по сравнению с гусеничными бронированными машинами. Этому способствовали следующие факторы:

- относительно низкая стоимость эксплуатации;
- авиатранспортабельность;
- мобильность;

Количество легкой бронетехники постоянно увеличивается, и в настоящее время она представлена широким спектром образцов [1, 2].

Однако в настоящее время нет единого концептуального взгляда на образ боевой бронированной машины легкой категории, как гусеничной, так и колесной, что представляет собой как военную, так и техническую проблему.

Особенностями гусеничных машин является меньшее удельное давление на грунт для данного уровня защиты. При этом транспортировка гусеничных машин авиатранспортом имеет серьезные проблемы, связанные с ограничениями, накладываемыми на её полную массу и габариты, а, следовательно, и на уровень броневой защиты.

Эволюция средств вооруженной борьбы, тактики ведения боя постоянно вносит свои коррективы к требованиям, предъявляемым к современной бронетехнике. На объекты легкой бронетехники стали устанавливать модули с малокалиберными автоматическими пушками (МАП), что существенно расширило спектр поражаемых целей, особенно бронированных машин легкой категории. Рациональное сочетание огневой мощи, защищенности и подвижности сделало ЛБМ неотъемлемой частью в системе бронетанкового вооружения [4, 5].

Обзор и анализ [1, 2] показывает, что всю совокупность ЛБМ составляют:

1. Боевые машины 1-го эшелона (передней линии), отличительной особенностью которых является уровень защищенности и подвижности соответствующие основным боевым танкам (ОБТ).

2. Боевые машины 2-го эшелона (мобильного), отличительной особенностью которых является авиатранспортабельность, способность преодолевать водные преграды на плаву, повышенная подвижность. Они предназначены для доставки личного состава и его огневой поддержки при зачистке территории после прохождения машин 1-й линии.

3. Боевые машины тылового обеспечения, предназначенные для всестороннего обеспечения боевых действий.

При этом все три типа боевых машин могут быть развернуты на едином шасси, или машины 1-й группы развернуты на шасси ОБТ, а машины 2 и 3 группы на легкой подвижной платформе. Такая подвижная платформа должна предусматривать как колесный, так и гусеничный движитель.

Как показывает опыт боевого применения колесного БТР "Stryker" в Ираке, колесная бронетехника существенно проигрывает гусеничным машинам по проходимости. На современном этапе развития бронетехники легкой категории по проходимости альтернативы гусеничным машинам не существует, однако колесная техника по динамике передвижения характеризуется более высокими показателями. Поскольку удельное давление на грунт танков составляет 0,87–1,09 кг/см<sup>2</sup>, у гусеничных машин лёгкой категории составляет 0,65–0,8 кг/см<sup>2</sup>, а у колесных машин легкой категории составляет от 1,5 кг/см<sup>2</sup> до 3,5 кг/см<sup>2</sup>, то наиболее приемлемым представляется рациональное сочетание колесных и гусеничных машин, в зависимости от решаемых задач, в системе бронетанкового вооружения [3].

Системный подход в формировании структуры вооруженных сил развивается давно. В последние 10–15 лет развитие компьютерной техники и технологии, миниатюризация элементной базы радиоэлектронной аппаратуры, позволило применить их в бортовых системах управления. Развитие средств связи, навигационных систем и других достижений в науке и технике, новые технологии, создают предпосылки объединения родов и видов вооруженных сил в единую информационно-управляющую систему.

Одним из начальных этапов создания такой системы является обеспечение принципиальной технической возможности реализации заложенных тактико-технических характеристик (ТТХ) машин при выполнении боевых задач и интеграции каждого образца в единую систему тактического, оперативно-тактического и систем более высоких уровней. При этом номенклатура образцов техники и требования к показателям ТТХ должны формироваться с учетом задач определяемых гиперсистемой управления. Непрерывное повышение требований к бронетехнике, увеличивает уровень её сложности, приводит к возникновению новых свойств, которые должны отражаться соответствующими классификационными признаками. Это в свою очередь приводит к необходимости их постоянной систематизации в виде классификации, которая представляется как открытая, постоянно дополняемая система.

В классификации (рис. 1) отображены основные функциональные свойства, огневая мощь, подвижность, защищенность, а также признаки, отражающие современные концепции, связанные с модульным принципом построения, универсальностью платформы, возможностью развертывания различного по функциональному назначению вооружения на базе одного шасси.

В настоящее время в Вооруженных Силах Украины имеются на вооружении ЛК и ГББМ: БМП-2, БТР-70, БТР-80 и различные машины на базе МТ-ЛБ (многоцелевой тягач легко бронированный). Такого рода разнообразие машин приводит к повышенным эксплуатационным затратам связанными с:

- высокой номенклатурой запасных частей;
- различной технологической базой ремонта и другими недостатками присущими не унифицированной сложной технической системе.

Аналогичная ситуация сложилась с ОБТ, поскольку в структуре вооружения имеются машины Т-64 (с двигателем 5-ТДФ), Т-80УД (с двигателем 6-ТД1), Т-84 (с двигателем 6-ТД2) и танк Т-72 (с двигателем В-46, В-84-1) [6].

Исходя из возможности унификации, концепция разработки бронетехники на единой платформе весьма привлекательна. Подобная концепция была разработана и воплощена в 60-е годы ОГК – Т "ХТЗ" в виде серии машин МТ-ЛБ. Следует отметить, что данная машина обладает следующими положительными качествами [7]:

- высокая проходимость (удельное давление на грунт составляет 0.6 кг/см<sup>2</sup>)
- плавучесть;
- возможность установки модульных экранов и легкоъемной брони;
- привлекательность платформы для установки малокалиберных автоматических пушек, поскольку не возникнет проблема обеспечения точности стрельбы связанная с жесткостью корпуса и подвески.

Весь типоразмерный ряд машин МТ-ЛБ, который включает машины, начиная от санитарно-эвакуационных до САУ и машин разведки, имеет автомобильный двигатель ЯМЗ-238, который широко применён в автомобильной технике до настоящего времени. Это обеспечило относительно невысокую стоимость как самого двигателя так и затрат на его эксплуатацию. Ему присущи высокая надёжность работы систем и механизмов, доступность запасных частей и эксплуатационных материалов.

МТ-ЛБ присущи ряд высоких показателей ТТХ по подвижности, массе, габаритам, которые соответствуют современным требованиям. К условным недостаткам тягача следует отнести низкий уровень защищенности, а поскольку машина не относится к боевым машинам передней линии, то и низкий уровень защищённости условный. При этом в настоящее время широко развита модульная легкоъемная броня, которая может обеспечить необходимый уровень защиты, в соответствии с предполагаемыми задачами.

Все положительные качества и имеющиеся наработки по МТ-ЛБ позволяют рассматривать её как отправную точку для разработки и создания семейства машин лёгкой категории на единой базе.

Опыт модернизации МТ-ЛБ имеется в России, Болгарии и Польше. Все это позволяет говорить о том, что в Украине имеются предпосылки для создания легкой боевой гусеничной машины на базе МТ-ЛБ.

Такое семейство колесных и гусеничных машин на единой базе включает:

- БМП;
- БТР;
- БРМ;
- машина огневой поддержки;
- машина командования и управления;
- машина ПВО;
- самоходная артиллерийская система для стрельбы с закрытых позиций (САУ);



- самоходная минометная система;
- самоходный ПТРК;
- БРЭМ;
- санитарно-эвакуационная машина;
- машина ремонта и обслуживания и ряд других машин.

Категория легких машин в настоящее время характеризуется неопределенностью общей концепции, их месте и роли в общей структуре бронетанкового вооружения. Это в свою очередь порождает большое разнообразие, как предполагаемых перспективных концептуальных разработок, так и большой спектр реализованных вариантов легкобронированных машин.

Современной концепцией развития боевых машин является их интеграция в информационно-управляющую боевую систему, позволяющую обеспечить связь между каждым элементом структуры единой боевой информационно-управляющей системы.

В заключении следует отметить, что классификация не может быть законченной для развивающегося класса машин, поскольку появление новых свойств, связанных с внедрением передовых технологий, новых конструкторско-командных решений порождают и новые классификационные признаки, которые немедленно должны включаться в классификацию с целью обобщения и анализа данных о машине, как сложной технической системы.

#### Литература

1. Федосеев С. Боевые машины пехоты. М.: "Издательство" Астрель", 2001. – 610 с.
2. Никольский М.В., Ильин В.Е. Колесная бронетехника. – М.: "Издательство Астрель", 2001. 511 с.
3. Анипко О.Б., Рикунев О.Н., Бусяк Ю.М. Анализ изменения приоритетов легких боевых колесных и гусеничных машин // Интегровані технології та енергозбереження. Харьков. НТУ“ХПИ”. – 2007. – №3. С. 51–66.
4. Андрейченко О.С. Перспективы разработки боевых модулей для легко бронированной техники // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Киев, НТЦ АСВ. – 2006. – №3. С.10–14.
5. Сергеев В. Ещё раз о концепции современной БМП // Техника и вооружение. – 2004. – №1. С. 8–17.
6. <http://armoured.vif2.ru/mt-lb.htm>
7. Рассел. А. Танки современных армий. – М.: "Издательство ЭКСМО – Пресс", 2000. – 160 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Fedoseev S. Boevyie mashinyi pehotyi. M.: "Izdatelstvo" Astrel", 2001. – 610 p.
2. Nikolskiy M.V., Ilin V.E. Kolesnaya bronetehnika. – M.: "Izdatelstvo Astrel", 2001. 511 p.
3. Anipko O.B., Rikunov O.N., Busyak Yu.M. Analiz izmeneniya prioritetov legkih boevyih kolesnyih i gusenichnyih mashin Integrovanp tehnologyi ta energozberezhennya. Harkov. NTU“HPI”. – 2007. – #3. p. 51–66.
4. Andreychenko O.S. Perspektivyi razrabotki boevyih moduley dlya legko bronirovannoy tehniki Artilleryiskoe i strelkovoe vooruzhenie. Kiev, NTTs ASV. – 2006. – #3. p.10–14.

5. Sergeev V. Eschyо raz о kontseptsii sovremennoy BMP Tehnika i vooruzhenie. – 2004. – #1. p. 8–17.
6. <http://armoured.vif2.ru/mt-lb.htm>
7. Rassel. A. Tanki sovremennyih armiy. – М.: "Izdatelstvo EKSMO – Press", 2000. – 160 p.

УДК 623.4.01

Аніпко О.Б., Рікунов О.М., Пономарев Є.П., Маренко Г.М.

### **ЩОДО ПИТАННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ЛЕГКИХ КОЛІСНИХ ТА ГУСЕНИЧНИХ БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН**

В статті представлена класифікація легких колісних та гусеничних машин, їх основні функціональні властивості, вогнева міць, рухомість, захищеність. Проаналізовані концептуальні зв'язки, сучасні тенденції, пов'язані з інтеграцією цього класу машин в єдину інформаційно-управляючу бойову систему.

УДК 355.014: 623.522

Бірюков І.Ю., Баулін Д.С.

**ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРІЛЕЦЬКОГО ОЗБРОЄННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БОЄПРИПАСІВ ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ**

Джерелом енергії для найбільш масового виду озброєння – стрілецької зброї – служить порох. Фізико-хімічні властивості піроксилінових порохів, які застосовуються у вітчизняних боєприпасах до стрілецької зброї, при зберіганні змінюються. Їх зміна може мати місце як у результаті чисто фізичних процесів, так і фізико-хімічних процесів. Це негативно відображається на балістичних властивостях пороху, та в остаточному підсумку балістичні властивості можуть досягти таких величин, при яких практичне застосування боєприпасів стає неможливим [1].

У зв'язку із цим, однією з основних вимог, що визначають придатність порохів до застосування, є достатня стійкість, тобто здатність протягом тривалого часу зберігати незмінними свої фізико-хімічні властивості. Тому питання про стійкість порохів здобуває першорядне значення, тому що саме вона визначає строки експлуатації боєприпасів взагалі та унітарних патронів для стрілецької зброї зокрема.

Тривалість зберігання споряджених патронів має винятково велике значення для визначення необхідних обсягів зберігання боєприпасів на базах і складах, тому що з цим пов'язані питання необхідних виробничих потужностей порохових заводів і питання системи контролю за станом порохів. Таким чином, визначення зміни властивостей порохів і боєприпасів залежно від строків їх зберігання представляється важливою науково-прикладною задачею і представляє значний практичний інтерес.

При тривалому зберіганні порохів відбуваються процеси їх старіння, у результаті чого можливе послаблення зв'язку між нітратами целюлози і розчинниками. Унаслідок цього в піроксилінових порохів при зберіганні відбувається збільшення речовин, що видаляються і зменшення речовин, що не видаляються, а можливо, при порушенні герметичності укупорці, і загальне зменшення летучих речовин, що приводить до зміни початкових швидкостей кулі і максимального тиску порохових газів [2].

Спираючи на теоретичні та експериментальні дослідження в області експлуатації боєприпасів різних термінів зберігання [3-6], можна зробити висновок, що існуючі порохи володіють лише більш-менш задовільною стійкістю, у результаті чого властивості порохів з часом змінюються.

Метою статті є визначення зміни балістичних характеристик боєприпасів до стрілецької зброї на різних етапах їх зберігання та їх вплив на балістичні і експлуатаційні характеристики зразків стрілецької зброї.

Для визначення кількісних показників впливу термінів зберігання боєприпасів на балістичні характеристики стрілецького озброєння були проведені експериментальні дослідження. В експериментах використовувалися боєприпаси різних термінів зберігання.

У ході експерименту були отримані значення початкових швидкостей кулі при різних термінах зберігання порохових зарядів різних боєприпасів та побудовано модель експлуатації боєприпасів залежно від строку їх зберігання (рис. 1).

Використання даної моделі, що прогнозує зміну початкової швидкості кулі від тривалості зберігання боєприпасів, створює передумови для переходу експлуатації стрілецької зброї по стану, без розробки і застосування діагностичної апаратури, при використанні як діагностичний параметр початкову швидкість кулі.

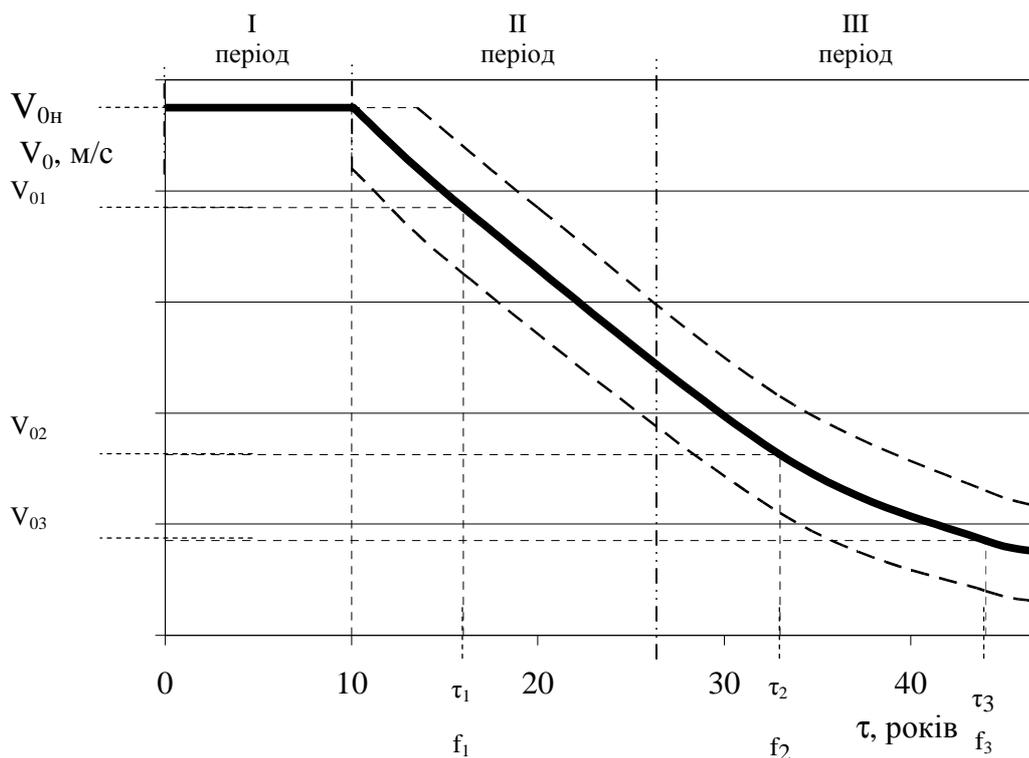


Рисунок 1 – Модель експлуатації боєприпасів залежно від строку їх зберігання  
 I період – до 10 років – гарантійний строк експлуатації, у межах якого балістичні характеристики є стабільними;  
 II період – 10–26 років – період зміни властивостей у припустимих межах;  
 III період – понад 26 років – період деградації порохових зарядів, протягом якого заряд підлягає регенерації, або боєприпаси в цілому повинні бути утилізованими

Для дослідження впливу боєприпасів з різними термінами зберігання на експлуатаційні характеристики стрілецької зброї, була визначена зміна живучості ствола 7,62 мм кулемета Калашникова ПКМС за виразом Габо-Слухоцького [7]:

$$N = K \cdot \frac{(D_0^2 - d^2) \cdot (1 + \Delta_d) \cdot e^{-n_1 \cdot t_0}}{e^{2,8 \cdot n_1 \cdot p_0 + n_2 \cdot T} \cdot \omega \cdot V_0^2} \cdot \left[ \Delta_d \cdot \left( \frac{V_1}{V_d} \right)^2 + \left( \frac{0,64}{1 + \chi_n \cdot \Delta_d} \cdot \frac{1}{V_0} \right)^2 \cdot 2 \cdot g \cdot \frac{1 + \Theta}{2 + \Theta} \cdot \frac{p_d}{\gamma_d} \right], \quad (1)$$

де \$K\$ – коефіцієнт, що залежить від калібру, глибини і крутості нарізів; \$D\_0\$ (м) – калібр по нарізам; \$d\$ (м) – калібр по полям; \$\Delta\_d = \frac{W\_d}{W\_0}\$ – число об’ємів розширення газів у каналі ствола; \$W\_d = S \cdot l\_d\$ (м<sup>3</sup>) – повний об’єм каналу ствола; \$S\$ (м<sup>2</sup>) – площа перетину каналу ствола; \$l\_d\$ (м) – повний путь кулі; \$W\_0\$ (м<sup>3</sup>) – об’єм зарядної камори; \$\omega\$ (кг) – маса заряду; \$V\_0\$ (м/с) – початкова швидкість кулі; \$n\_1 = k \cdot (1 - \lambda\_1)\$ – коефіцієнт [7]; \$k\$ – коефіцієнт [7]; \$\lambda\_1\$ – коефіцієнт [7]; \$n\_2 = k \cdot \lambda\_1\$ – коефіцієнт [7]; \$p\_0\$ (кг/м<sup>2</sup>) – тиск форсування; \$T\$ (°C) – температура горіння пороху; \$t\_0\$ (°C) – температура поверхневого шару ствола до початку

врізання кулі в нарізі;  $\frac{V_1}{V_d}$  – коефіцієнт із таблиці [7];  $\chi_n = \frac{1}{\frac{1}{\chi} + 0,75 \cdot \frac{d}{l_0}}$  – коефіцієнт

[7];  $\chi$  – коефіцієнт розширення;  $l_0$  (м) – приведена довжина камори;  $g$  (м/с<sup>2</sup>) – прискорення вільного падіння;  $\Theta$  – характеристика;  $P_d$  (кг/м<sup>2</sup>) – дульний тиск;  $\Delta$  (кг/м<sup>3</sup>) – щільність заряджання  $\gamma_d = \frac{\Delta}{(1 + \Delta_d) \cdot 1000}$  (кг/м<sup>3</sup>) – коефіцієнт.

На рис. 2 показана зміна живучості ствола 7,62 мм кулемета Калашникова ПКМС у залежності від терміну зберігання використаних боєприпасів.

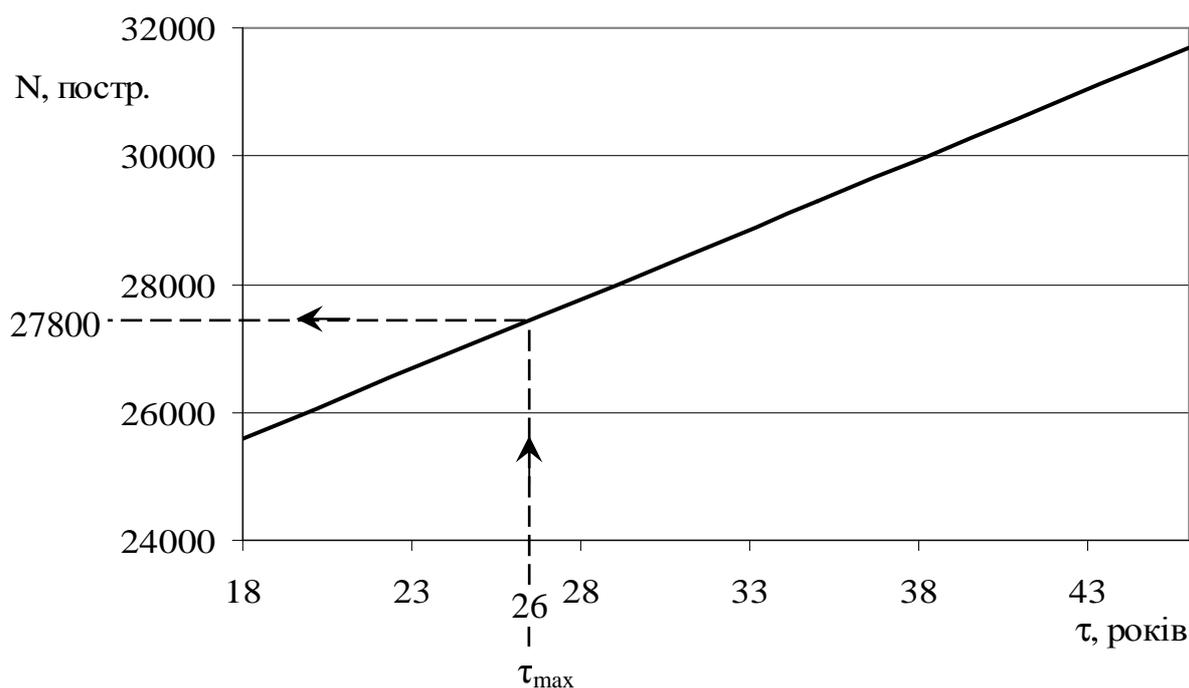


Рисунок 2 – Живучість ствола як функція від терміну зберігання боєприпасів

Як видно з графіка (рис. 2), живучість ствола підвищується, але це збільшення відбувається головним чином через зменшення маси заряду в результаті тривалого зберігання боєприпасів, і може досягти величини в 27800 пострілів. З огляду на те, що максимальний термін зберігання боєприпасів без зниження початкової швидкості кулі ( $V_0$ ) більш ніж на 5% від номінального значення ( $V_0^{\text{норм}}$ ) складає  $\approx 26$  років [8], подальше підвищення живучості ствола за рахунок застосування боєприпасів понад цей термін зберігання не може бути використано, тому що при цьому різко погіршуються балістичні характеристики зброї, а саме початкова швидкість кулі.

Оцінюючи отримані результати слід зазначити, що вираз (1) не враховує максимальний тиск порохових газів ( $p_{\text{max}}$ ), що суттєво впливає на живучість ствола стрілецької зброї. При використанні даної формули необхідно також враховувати, що на різних термінах зберігання змінюються наступні характеристики:

- початкова швидкість кулі;
- маса заряду боєприпасів;
- час досягнення тиску форсування при пострілі;

- дульний тиск;
- щільність заряджання.

У роботах [5, 9] експериментально встановлено, що при тривалому зберіганні боєприпасів максимальний тиск зростає, а дульний тиск падає.

Таким чином, вираз Габо-Слухоцького безпосередньо не може застосовуватися для прогнозування надійності стволів при використанні боєприпасів тривалих термінів зберігання.

В даний час немає точних аналітичних методів рішення задачі по прогнозуванню живучості стволів стрілецької зброї.

У зв'язку з цим, була визначена зміна живучості ствола по виразу Габо-Слухоцького, але з урахуванням зміни характеристик, зазначених вище. На рис. 3 представлена зміна живучості ствола з урахуванням зміни початкової швидкості кулі, маси заряду боєприпасів, часу досягнення тиску форсування при пострілі, дульного тиску, щільності заряджання.

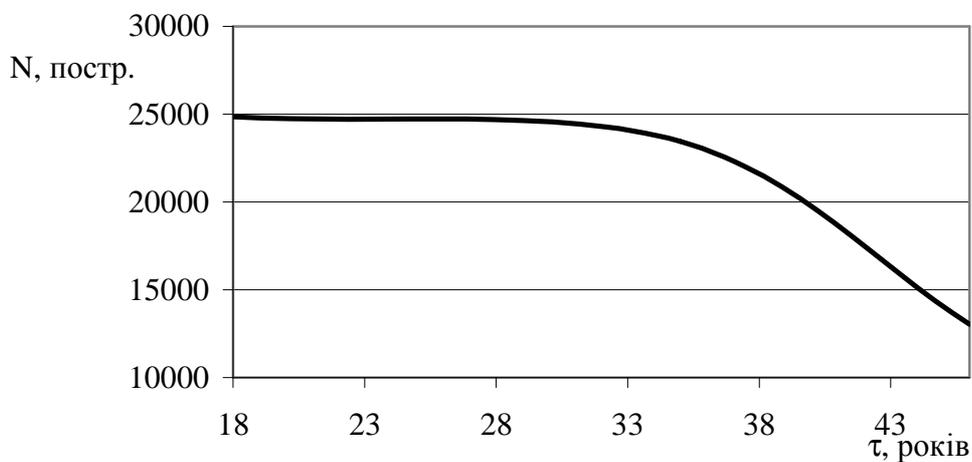


Рисунок 3 – Живучість ствола як функція від терміну зберігання боєприпасів

$$N(\tau) = - 30,8\tau^2 + 1552,1\tau + 6908,4. \quad (2)$$

Аналізуючи отримані результати можна відзначити, що вираз Габо-Слухоцького відчутно до зміни балістичних характеристик порохів і може бути застосовано для відносного аналізу стану і прогнозування живучості стволів стрілецької зброї, але воно орієнтовано на нові боєприпаси зі свіжими порохами. Виходячи з цього, застосовуючи метод оцінки і прогнозування фізико-хімічних властивостей порохів, запропонований у роботі [9], а звідси і живучості стволів, по величині початкової швидкості кулі дозволить використовувати його у військових полігонних умовах, що є суттєвою перевагою в порівнянні з застосуванням манометричної бомби.

При експлуатації стрілецької зброї необхідно враховувати терміни зберігання боєприпасів і, відповідно до цього, визначити додаткові терміни перевірки зносу каналів стволів і проводити коректування прицільних пристосувань по дальності.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування балістичних властивостей порохів і боєприпасів у залежності від тривалості їх зберігання, а також для вироблення рекомендацій щодо можливості застосування боєприпасів різних термінів зберігання для виконання службово-бойових задач, бойової підготовки.

Методика прогнозування властивостей порохового заряду залежно від строку їх експлуатації впроваджена в КП ХКБМ ім. О.О. Морозова та застосовується для підготовки і проведення стрільбових випробувань 7,62 мм кулеметів ПКТ, які устано­влюються на нових і модернізованих зразках бронетанкової техніки.

#### Література

1. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972. – 208 с.
2. Будников М.А., Левкович Н.А., Быстров И.В., Сиротинский В.Ф., Шахтер Б.И. Взрывчатые вещества и пороха. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1955. – 364 с.
3. Баулін Д.С. Експериментальне дослідження впливу конструктивних характеристик боєприпасів на початкову швидкість куль // Збірник наукових праць “НАДПС України ім. Б.Хмельницького”. – 2004. – №31. С. 5–7.
4. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Методы термодинамики, тепло- и массопереноса для решения обратной задачи внутренней баллистики // Интегровані технології та енергозбереження. – Х. 2005. – №2. С. 63–68.
5. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Баулин Д.С. Модель массопереноса при хранении пороховых зарядов с учетом изменения температуры окружающей среды // Збірник наукових праць ХУПС. – 2006. – 2 (8). – С. 50–54.
6. Бирюков И.Ю. Пороховые заряды длительных сроков хранения: проблемы, задачи и пути их решения // Интегровані технології та енергозбереження. – Х. 2006. – №2. – С. 50–55.
7. Чуев Ю.В. Проектирование ствольных комплексов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
8. Буллер М.Ф., Межевич Г.В. Методы испытания утилизируемых порохов. – К.: Изд-во ООО “ДИА”, 2005. – 94 с.
9. Анипко О.Б., Баулин Д.С., Бусяк Ю.М. Обратная задача внутренней баллистики для прогнозирования свойств порохов при длительном их хранении // Интегровані технології та енергозбереження. Харьков, НТУ“ХПИ” – 2005. – №4. С. 109–114.

#### Bibliography (transliterated)

1. Gorst A.G. Poroha i vzryvchatyie veschestva. – М.: Mashinostroenie, 1972. – 208 p.
2. Budnikov M.A., Levkovich N.A., Byistrov I.V., Sirovinskiy V.F., Shahter B.I. Vzryvchatyie veschestva i poroha. – М.: Gosudarstvennoe izdatelstvo oboronnoy promyishlennosti, 1955. – 364 p.
3. Baulin D.S. Eksperimentalne doslidzhennya vplivu konstruktivnih karakteristik boeprispasiv na pochatkovu shvidkist kul Zbirnik naukovih prats “NADPS Ukrayini im. B.Hmelnitskogo”. – 2004. – #31. p. 5–7.
4. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Metodyi termodinamiki, teplo i massoperenosa dlya resheniya obratnoy zadachi vnutrenney ballistiki Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – H. 2005. – #2. p. 63–68.
5. Anipko O.B., Biryukov I.Yu., Baulin D.S. Model massoperenosa pri hranenii porohovyih zaryadov s uchetom izmeneniya temperatury okruzhayushey sredy Zbirnik naukovih prats HUPS. – 2006. – 2 (8). – p. 50–54.

6. Biryukov I.Yu. Porohovyye zaryadyi dlitelnyih srokov hraneniya: problemy, zadachi i puti ih resheniya Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. – Н. 2006. – #2. – р. 50–55.

7. Chuev Yu.V. Proektirovanie stvolnyih kompleksov. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 216 p.

8. Buller M.F., Mezhevich G.V. Metodyi ispytaniya utiliziruemyih porohov. – К.: Izd-vo ООО “DIA”, 2005. – 94 p.

9. Anipko O.B., Baulin D.S., Busyak Yu.M. Obratnaya zadacha vnutrenney ballistiki dlya prognozirovaniya svoystv porohov pri dlitelnom ih hranenii Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. Harkov, NTU“НPI” – 2005. – #4. р. 109–114.

УДК 355.014: 623.522

Бирюков И.Ю., Баулин Д.С.

### **ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БОЕПРИПАСОВ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ**

В статье рассмотрено влияние сроков хранения боеприпасов на эксплуатационные характеристики стрелкового оружия. Предложены модель эксплуатации боеприпасов на различных этапах хранения и практические рекомендации по дальнейшему их использованию.

УДК 629.735.45.036

Анипко О.Б., Иленко Е.Ю.

## **ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕРАСЧЕТНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба*

В настоящее время в боевом составе видов Вооруженных Сил Украины находится более 550 боевых самолетов (Су-24, МиГ-29, Су-27, Су-25), 32 транспортных самолета, более 180 боевых вертолетов (Ми-8, Ми-24, Ми-26). В перспективе в организационно-штатной структуре Воздушных Сил Украины 2011 года планируется иметь 216 боевых самолетов, 26 транспортных самолетов; в Военно-Морских Силах – 4 противолодочных самолета и 10 противолодочных вертолетов; в Сухопутных войсках – 76 боевых вертолетов.

подавляющее большинство эксплуатирующихся сейчас объектов авиационной техники (АТ) и авиационных двигателей (АД), входящих в состав их силовых установок, выпущены в 80-х годах. Замена объектов АТ новыми образцами происходит медленно, несвоевременно и нерегулярно проводится капитальный ремонт авиационных двигателей, как исчерпавших свой межремонтный ресурс, так и досрочно снятых с эксплуатации по причине ресурсных отказов. Капитальный ремонт предусматривает полную разборку двигателей и дефектацию его систем, узлов и агрегатов в заводских условиях. Его отсутствие значительно ограничивает возможность модернизации АД на основе анализа данных о результатах дефектации, а также о причинах отказов и неисправностей, выявленных при эксплуатации, и особенно отказов, приводящих к досрочному снятию АД. Нарушен механизм обратной связи между эксплуатирующей организацией, ремонтным предприятием и предприятием – разработчиком [1].

Современный этап эксплуатации авиационной техники характеризуется низкой интенсивностью использования объектов по назначению – значительными сроками пребывания летательных аппаратов (ЛА) на хранении или их простоем в отсутствие полетов. Меняется структура жизненного цикла ЛА, что, в случае сочетания с особенностями эксплуатации, вызванными практической необходимостью, приводит к несоответствию показателей надежности объектов АТ установленным требованиям.

Силовая установка ЛА является одним из элементов, наиболее чувствительным к особенностям эксплуатации. Неполное знание и учет действительных условий работы АД и фактических нагрузок, отличных от расчетных, а также неточное воспроизведение их при испытаниях по оценке уровня надежности отдельных систем и изделия в целом, является одной из основных причин недостаточной надежности АД. Испытания авиационного двигателя на ресурс существенно больше по продолжительности и сложнее по условиям проведения в сравнении с испытаниями по определению технических характеристик. Однако испытания на ресурс не могут в полной мере дать оценку влиянию на надежность двигателя всех возможных сочетаний неблагоприятных факторов. Низкая интенсивность эксплуатации АД на протяжении последних 5–10 лет является нерасчетной для двигателей, проектируемых и выпущенных в 80-х годах, и приводит к ускоренной выработке двигателем своего ресурса. Возникла объективная необходимость оценки остаточного ресурса эксплуатируемых в настоящее время авиационных двигателей.

Такою оцeнку можна зробити на основі обробки експериментальних дослідвань експлуатації об'єктів авіаційної техніки в ідентичних, з точки зору однородності, умовах, відрізняючись від розрахункового режиму експлуатації [2]. Однак експериментальні дослідження подібного роду значно ускладнюється проводити в зв'язі з великими фінансовими і часовими витратами, а також через необхідність забезпечення ідентичності умов проведення експерименту, при наявності різноманітності всіх можливих комбінацій несприятливих факторів. Тому цінною є інформація про відмови і несправності, отримана з польотних частин, при експлуатації серійних зразків АТ в умовах, відрізняючись від розрахункових.

Структурно-логічна схема рішення наукової задачі прогнозування залишкового ресурсу вертолітних двигачів представлена на рисунку 1.

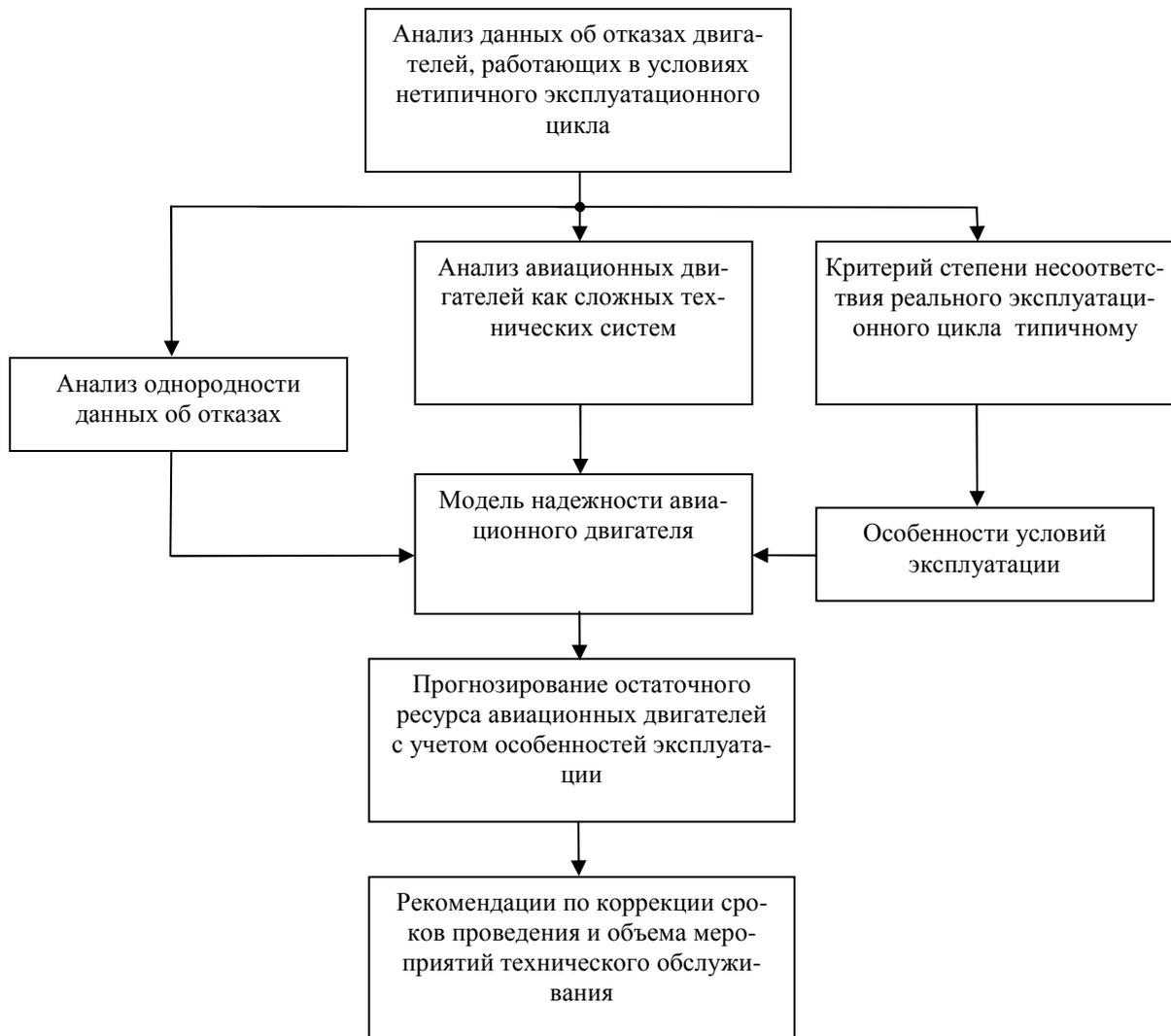


Рисунок 1 – Структурно логическая схема решения научной задачи прогнозування залишкового ресурсу вертолітних двигачів

Аналіз експлуатації вертолітних двигачів ГТД-350, що входять в склад силових установок вертолітів Мі-2, в польотних навчальних частинах виявив їх низький рівень надійності [3]. Нароботка на досрочне зняття АД ГТД-350 за період їх використання

ния с 1995 по 2006 год, для каждой группы двигателей в зависимости от межремонтного ресурса оказалась соизмерима с величиной межремонтного ресурса [3-4].

В условиях отсутствия объективной возможности проведения анализа физических причин отказов, приводящих к досрочному снятию двигателей в ремонт, в работе [1] использована вероятностно-статистическая модель эксплуатации на основе изменения вероятности безотказной работы вертолетных АД от времени наработки. Обоснование вида функции распределения времени безотказной работы осуществлено на основе исследования интенсивности появления ресурсных отказов рассматриваемых двигателей в зависимости от величины израсходованного ресурса. Установлено, что поток отказов, приводящих к досрочному снятию АД в ремонт, является Пуассоновским, удовлетворяющим условиям ординарности, стационарности и отсутствия последствия, поэтому для проведения исследования использована экспоненциальная модель функции надежности:

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau}, \tag{1}$$

где  $P(\tau)$  – вероятность безотказной работы по отношению к отказам, приводящим к досрочному снятию двигателя в ремонт, как функция наработки;  $\tau$  – наработка двигателей в рассматриваемых условиях;  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Прогнозирование остаточного ресурса основано на оценке среднего значения наработки группой объектов до достижения величиной показателя надежности своего порогового уровня (рис. 2). Достижение системой порогового уровня надежности в рамках заданного ресурса приводит к появлению ресурсных отказов [7], что становится причиной неполной выработки системой назначенного (межремонтного) ресурса.

На рисунке 2 представлен график изменения расчетного значения вероятности безотказной работы авиационного двигателя в процессе его эксплуатации до отправки в ремонт [5], описываемый выражением (1), где  $\lambda = \lambda_{расчетн}$  соответствует расчетным условиям, а  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  – эксплуатации с учетом факторов, повышающих интенсивность исчерпания ресурса.

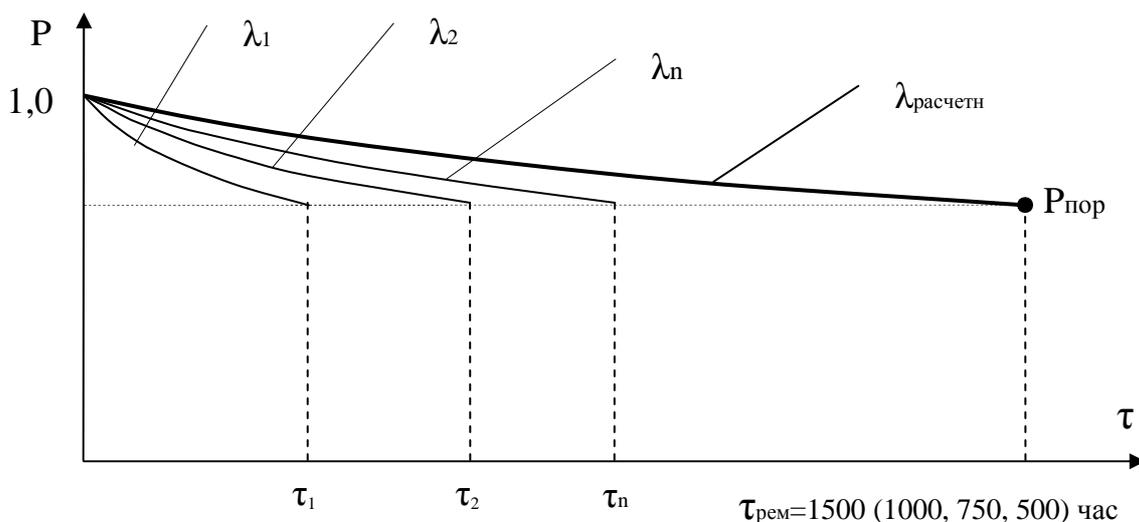


Рисунок 2 – Изменение надежности авиационного двигателя ГТД-350 в процессе его эксплуатации до ремонта

На основанні аналізу факторів, оказують вплив на надійність вертолетних двигателів (рис. 3), виявлено, що специфікою експлуатації двигателів в умовах учебної летної частини є характеристика експлуатаційного циклу, котра включає середню тривалість польоту та навантаженість циклу, тобто частку в ньому взлітних та номінальних режимів роботи двигача [3].



Рисунок 3 – Причини проведення на АД ГТД-350 капітальних ремонтів в поєднанні з факторами, впливаючими на надійність вертолетного АД

Ця особливість обумовлена вимогами програми курсу учебно-летної підготовки летчиків, котра передбачає виконання певної кількості польотів з заданою тривалістю та строгим змістом польотного завдання [3,6]. На основі аналізу специфіки експлуатації вертолетного двигача ГТД-350 в умовах летної учебної частини розроблено показник ступеня невідповідності фактичного експлуатаційного циклу типовому (R) [1]:

$$R = \frac{T_{\text{э.ц.тип}}}{T_{\text{э.ц.факт}}} = \frac{T_{\text{э.ц.тип}} \cdot n_{\text{пос}}}{T_{\Sigma}}, \quad (2)$$

де  $T_{\text{э.ц.тип}}$  – тривалість типового експлуатаційного циклу;  $T_{\text{э.ц.факт}}$  – середня тривалість (фактична) експлуатаційного циклу в нерасчетном режимі експлуатації;  $n_{\text{пос}}$  – кількість посадок вертолета;  $T_{\Sigma}$  – сумарна наработка двигачів в розглянутих специфічних умовах.

Значение  $R=1$ , когда средняя длительность фактического эксплуатационного цикла равна величине типичного цикла  $T_{\text{э.ц.факт}} = T_{\text{э.ц.тип}}$ . Если  $R < 1$ , значит  $T_{\text{э.ц.факт}} > T_{\text{э.ц.тип}}$  и вертолет совершает меньшее количество посадок в процессе выработки межремонтного ресурса в сравнении с расчетным значением. Случай, когда  $R > 1$ , свидетельствует, что  $T_{\text{э.ц.факт}} < T_{\text{э.ц.тип}}$  и количество посадок, совершаемых вертолетом, в  $R$  раз превосходит расчетное значение.

Установлено [1,3], что средняя продолжительность эксплуатационного цикла двигателя ГТД-350 при эксплуатации его в условиях летной учебной части в  $R=1,93-2,2$  раза меньше продолжительности типичного цикла. Это приводит к перераспределению времени между этапами полета и увеличивает долю «тяжелых» режимов работы двигателя (номинального и взлетного). Возрастает число приемистостей двигателя и время его работы на неустановившихся режимах на протяжении выработки ресурса в  $R$  раз.

С целью получения классификации отказов двигателей ГТД-350 по системам, узлам и агрегатам, разработаны иерархические структурные схемы подсистем двигателя, которые представлены на рисунках 4–11.



Рисунок 4 – Структурная схема редуктора АД ГТД-350

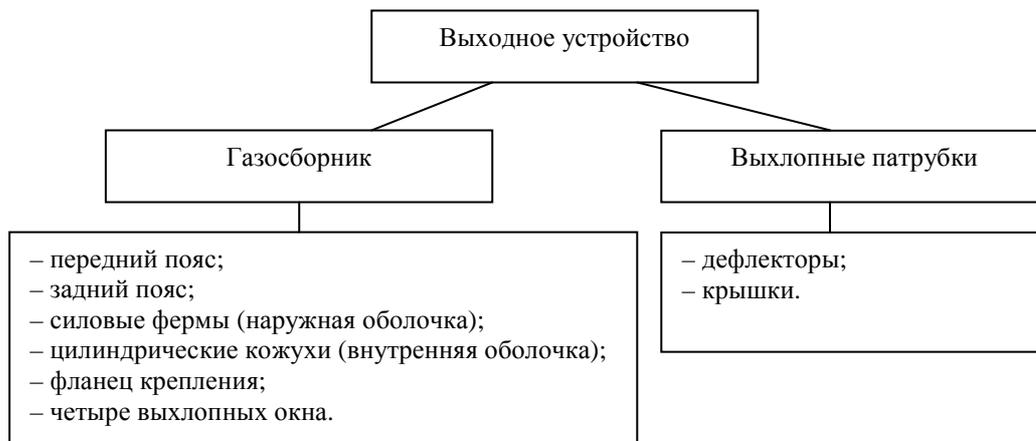


Рисунок 5 – Структурная схема выходного устройства АД ГТД-350



Рисунок 6 – Структурная схема компрессора АД ГТД-350

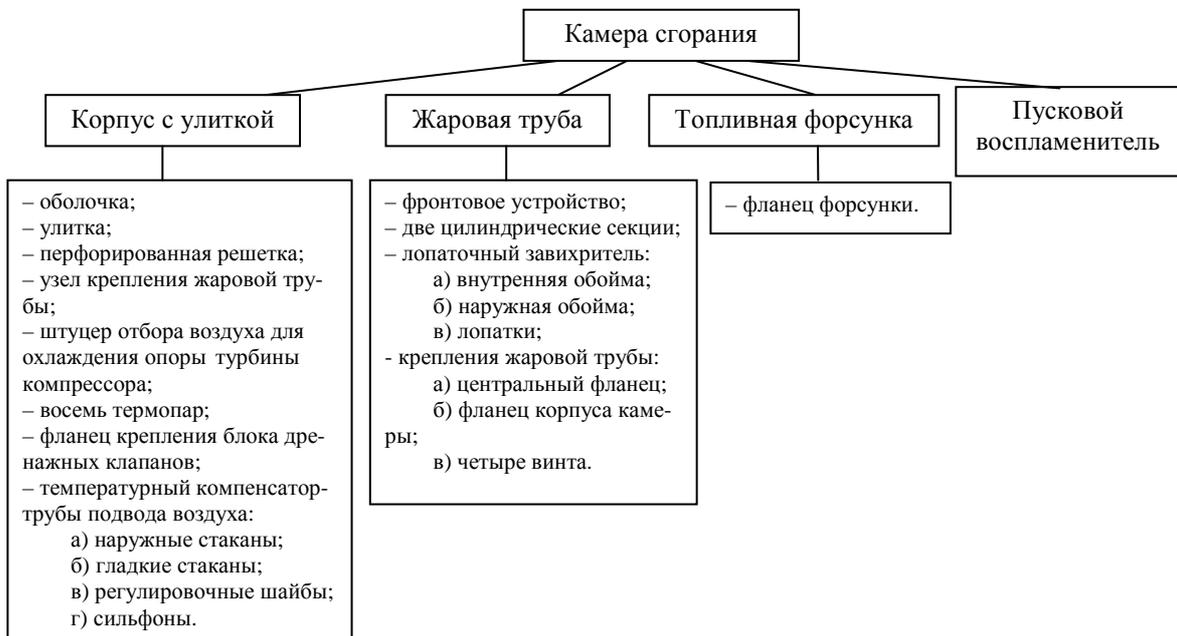


Рисунок 7 – Структурная схема камеры сгорания АД ГТД-350



Рисунок 8 – Структурная схема турбины компресора АД ГТД-350

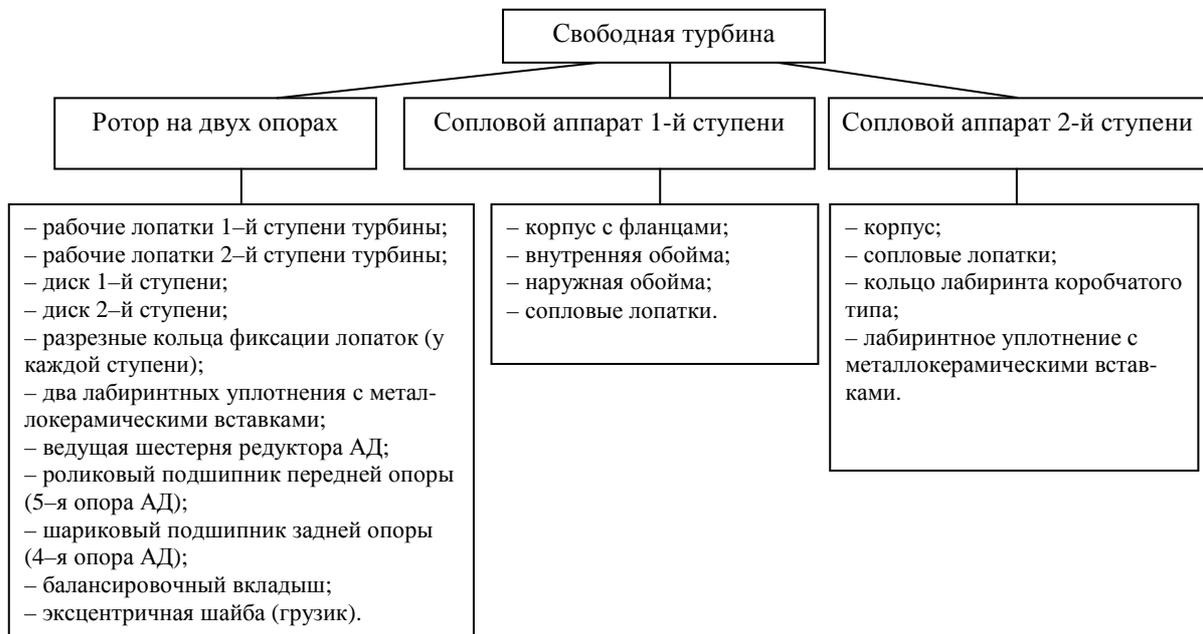


Рисунок 9 – Структурная схема свободной турбины АД ГТД-350



Рисунок 10 – Структурная схема топливной системы АД ГТД-350

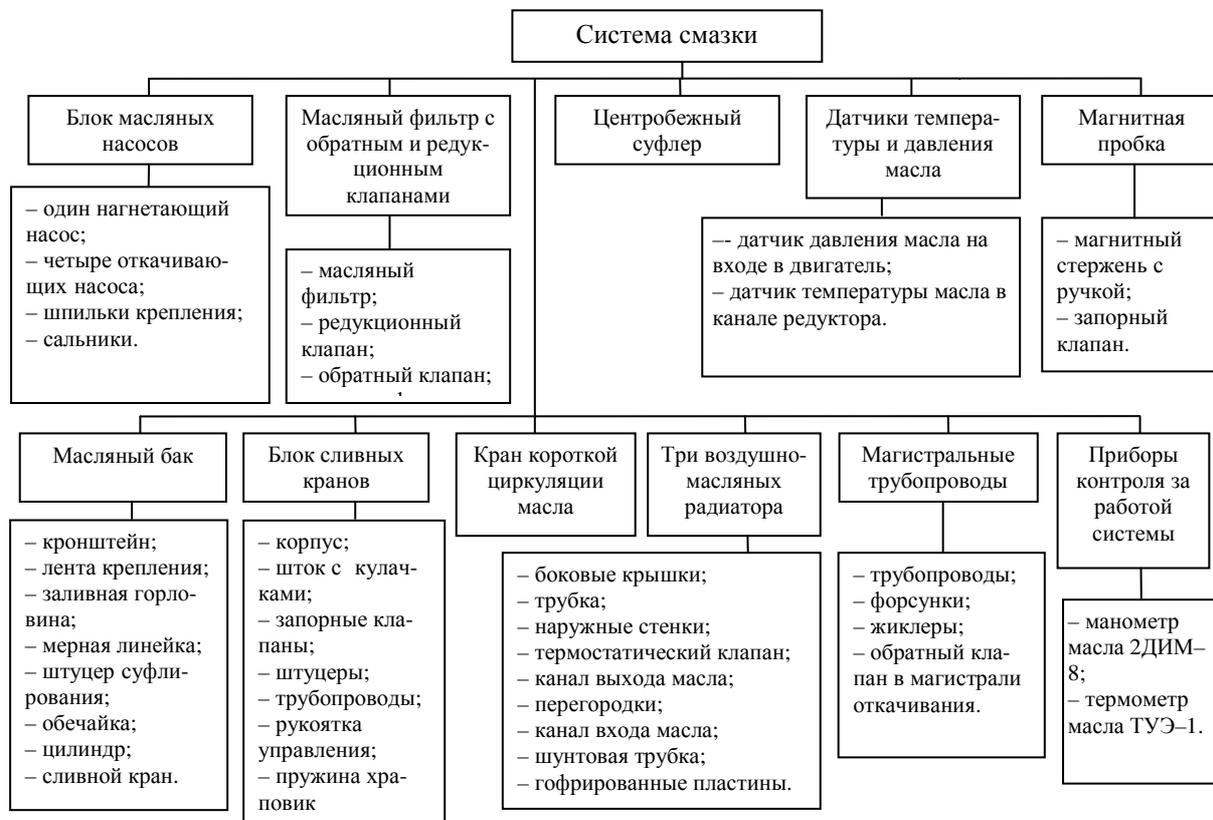


Рисунок 11 – Структурная схема системы смазки АД ГТД-350

Глубина анализа структуры определялась возможной степенью детализации при поиске отказавшего элемента специалистами эксплуатирующей организации. Иерархия элемента нижнего уровня зависела, во-первых, от существования физической возможности выхода из строя именно этого элемента, во-вторых, возможностью определить этот факт с помощью имеющихся средств контроля технического состояния.

По данным об эксплуатации вертолетных двигателей ГТД-350 в нерасчетных условиях, используя иерархические структурные схемы двигателя, разработана классификация отказов АД по системам, узлам и агрегатам [5].

Функция надежности двигателя (1) может быть представлена в виде уравнения следующего вида:

$$P(\tau) = k_1P_1(\tau) + k_2P_2(\tau) + \dots + k_nP_n(\tau), \quad (3)$$

где  $P(\tau)$  – функция вероятности безотказной работы АД в целом;  $k_1, k_2, \dots, k_n$  – весовые коэффициенты, характеризующие вклад каждой из подсистем двигателя в величину показателя надежности, причем  $k_1 + k_2 + \dots + k_n = 1$ ;  $P_1(\tau), P_2(\tau), \dots, P_n(\tau)$  – функции распределения времени безотказной работы каждой из подсистем объекта.

Выражение  $P(\tau)$  в левой части уравнения находится на основании данных о наработке до отказа группы вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в одинаковых условиях. Весовые коэффициенты  $k_1, k_2, \dots, k_n$  получают из анализа данных об отказах подсистем объекта как долю отказов каждой отдельной подсистемы из общего числа отказов объекта. Функции распределения времени безотказной работы подсистем  $P_1(\tau), P_2(\tau), \dots, P_n(\tau)$  находят на основании данных о наработке до отказа каждой из подсистем двигателей рассматриваемой группы.

Классификация отказов [5] позволяет определить величины весовых коэффициентов для решения задачи разложения функции надежности по подсистемам. Тогда уравнение (1) с учетом (3) принимает вид:

$$e^{-\lambda t} = 0,128P_{\text{тк}}(\tau) + 0,128P_{\text{рд}}(\tau) + 0,064P_{\text{ву}}(\tau) + 0,043P_{\text{тс}}(\tau) + 0,638P_{\text{сц}}(\tau), \quad (4)$$

где  $P_{\text{тк}}(\tau), P_{\text{рд}}(\tau), P_{\text{ву}}(\tau), P_{\text{тс}}(\tau), P_{\text{сц}}(\tau)$  – функции вероятности безотказной работы узлов и подсистем верхнего уровня иерархии двигателя ГТД-350: турбины компрессора, редуктора двигателя, выходного устройства, топливной системы и системы смазки соответственно. Весовые коэффициенты других систем и узлов АД (компрессора, системы охлаждения, камеры сгорания, свободной турбины, входного устройства) равны нулю по причине отсутствия ресурсных отказов этих систем. Анализ уравнения (4) показывает, что влияние подсистем на надежность двигателя ГТД-350 различно. Наименее надежными элементами являются: турбина компрессора, редуктор и система смазки. Влиянием на надежность двигателя топливной системы и выходного устройства можно пренебречь, при этом точность анализа снизится примерно на 10 %.

Разложение функции надежности объекта по подсистемам является основой методического подхода по определению динамики проявления ресурсных отказов, вызванных различными группами причин, в зависимости от длительности наработки в нерасчетных условиях.

Для обработки результатов эксплуатации двигателя были разделены на группы в зависимости от величины межремонтного (до первого ремонта) ресурса: 1500, 1000, 750, 500, 375, 250 часов. Ввиду малого объема выборки двигателей с межремонтными ресурсами 375 и 250 часов, для этих групп прогнозирование остаточного ресурса не

производилось. В работе [2] с помощью критерия «хи-квадрат» Пирсона проведена проверка однородности данных об отказах для групп двигателей с межремонтными ресурсами 1500, 1000, 750 и 500 часов.

Результаты проверки показали [2], что с вероятностью не менее  $\gamma = 0,95$  можно утверждать, что статистическая гипотеза об однородности выборки данных может быть принята для групп двигателей с межремонтным ресурсом 1500 часов, и с вероятностью  $\gamma = 0,999$  – для групп двигателей с ресурсами 750 часов и 500 часов. Данные об отказах групп двигателей с межремонтным ресурсом 1000 часов рассматривать как однородные некорректно по причине недостаточного количества наблюдений изучаемого события (отказов, приводящих к досрочному снятию двигателя в ремонт).

Для групп двигателей с ресурсом 1500, 750 и 500 в работе [4] осуществлено прогнозирование величины  $\gamma$ -процентного ресурса. Пороговым значением вероятности безотказной работы была принята величина  $P_{пор} = 0,9$ . Полученные результаты (рисунок 12) свидетельствуют, что показатели надежности рассмотренных АД значительно ниже установленных.

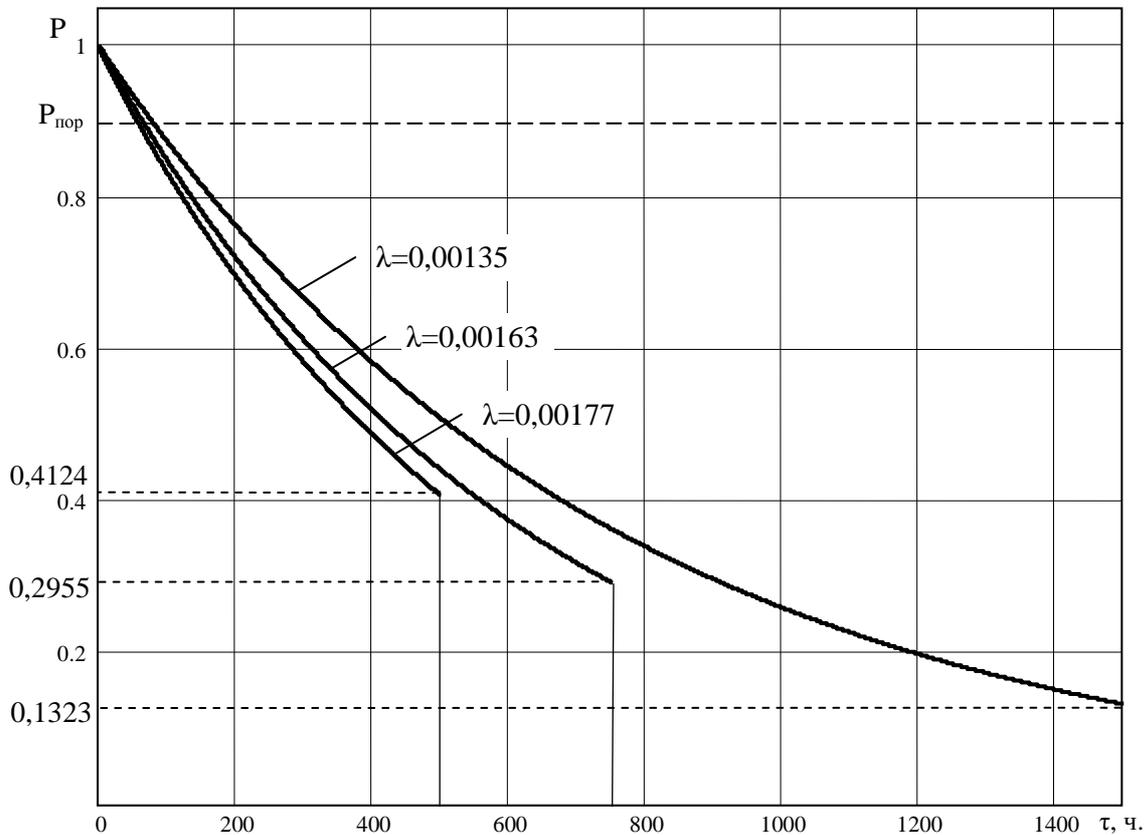


Рисунок 12 – Прогнозирование вероятности не снятия двигателей ГТД-350 досрочно в ремонт в зависимости от наработки и межремонтного ресурса

Вероятность того, что двигатели при достижении своего межремонтного ресурса не будут сняты с эксплуатации досрочно в ремонт, для двигателей с межремонтным ресурсом 1500, 750 и 500 часов составляет соответственно величину 0,1323, 0,2955, 0,4124.

На основании полученных значений интенсивности отказов  $\lambda$  для групп двигателей с межремонтными ресурсами 500, 750 и 1500 часов построена общая зависимость  $\lambda$  от величины межремонтного ресурса (рис. 13).

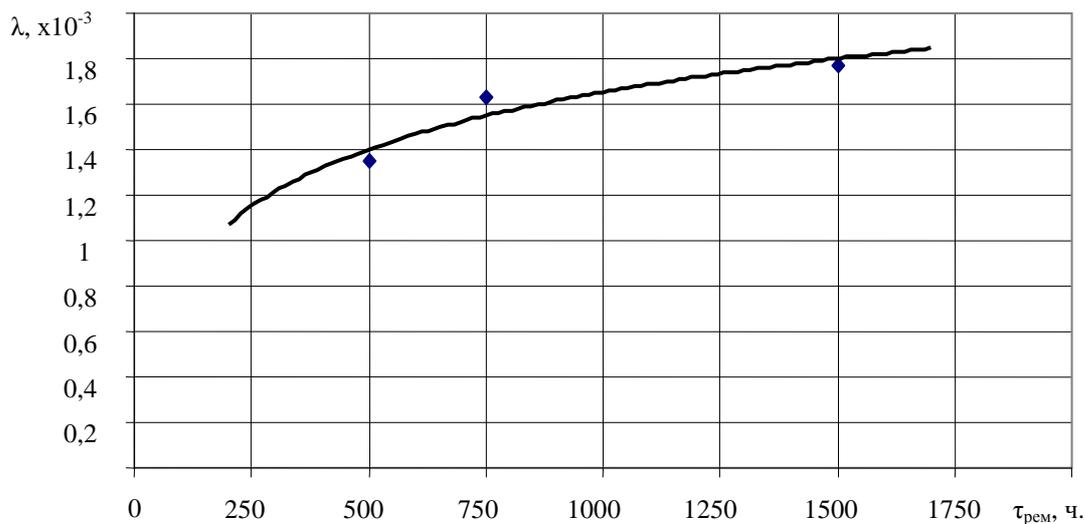


Рисунок 13 – Залежність інтенсивності отказів від величини межремонтного ресурса двигателя

Представлена на рисунку 13 залежність дозволяє оцінити величину інтенсивності отказів  $\lambda$  двигателів інших груп межремонтного ресурса, для яких статистичне визначення  $\lambda$  затруднено по причині недостаточного об'єму вибірки досліджуваних об'єктів.

Результати дослідження надійності вертолетних двигателів ГТД-350, експлуатуються в умовах нетипичного експлуатаційного циклу, легли в основу обробки рекомендацій по корекції термінів проведення і об'єму заходів технічного обслуговування (рис. 14).

На рисунку 14 показано планування капітальних ремонтів двигателів ГТД -350 при експлуатації їх в розрахункових умовах при розрахунковому значенні інтенсивності отказів  $\lambda_{\text{розрах}} ,$  і в умовах нетипичного експлуатаційного циклу (показатель ступеня несоответствия  $R=1,93-2,2$ ) при фактичному значенні інтенсивності отказів, приводящих до досрочного зняття АД в ремонт, рівної  $\lambda_{\text{факт}} .$

Для запобігання виникнення ресурсних отказів для груп двигателів з межремонтними ресурсами 1500, 750, 500 годин величини межремонтного ресурса повинні бути рівними відповідно  $T_{\text{тр.1500}} = 78$  годин,  $T_{\text{тр.750}} = 65$  годин,  $T_{\text{тр.500}} = 60$  годин. В цьому випадку показник надійності двигателів не досягне порогового рівня  $R_{\text{пор}}=0,9.$

Класифікація отказів вертолетних двигателів по підсистемам була використана ОАО «Мотор Сич» при обґрунтуванні продовження ресурсу і модернізації вертолетних двигателів ГТД-350.

Розроблений підхід до прогнозування залишкового ресурсу вертолетних газотурбінних двигателів ГТД-350, експлуатуються в нерозрахункових умовах, застосований для прогнозування технічного стану вертолетних двигателів ТВ2-117 і ТВ3-117, встановлених на вертольотах Ми-8 і Ми-8МТ (Ми-8МТВ), які експлуатуються на авіаційній базі Внутрішніх військ МВД України.

Таким чином, розроблений підхід до прогнозування залишкового ресурсу вертолетних двигателів, як складних технічних систем, є універсальним і може бути застосований для інших авіаційних двигателів і інших технічних систем.

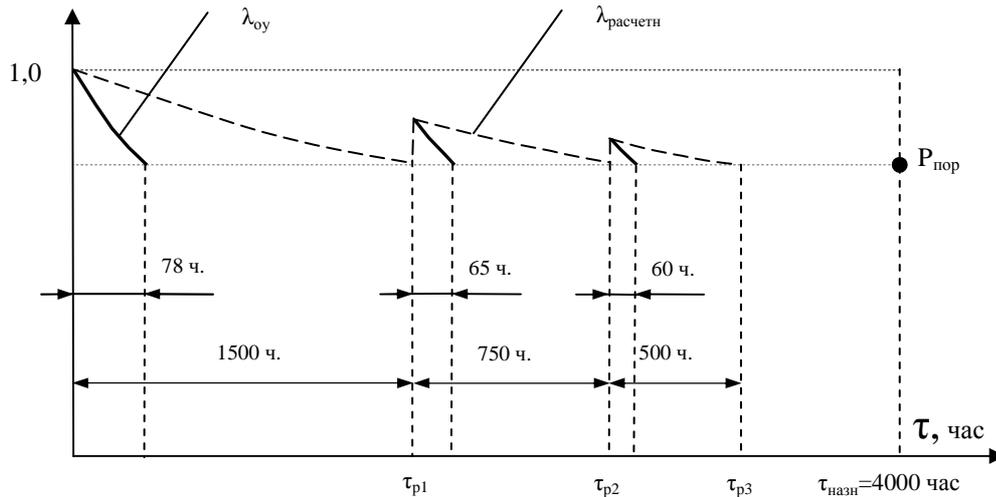


Рисунок 14 – Планирование капитальных ремонтов вертолетного двигателя ГТД-350 при показателе степени несоответствия эксплуатационного цикла  $R=1,93-2,2$

### Литература

1. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса объектов вооружения и военной техники в нерасчетных условиях эксплуатации // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Харьков: НАКУ “ХАИ”.– 2008.
2. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Статистическая однородность выборки данных об отказах при эксплуатации вертолетных двигателей // Интегровані технології та енергозбереження. Харків: НТУ «ХПІ».– 2007.– №3 – С. 37–41.
3. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Эксплуатационный цикл авиационного двигателя как критерий оценки его ресурса // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Харків: ХУ ПС. – 2006. – №2(8) – С. 4–6.
4. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Прогнозирование  $\gamma$ -процентного ресурса вертолетного двигателя на основании данных эксплуатации // Интегровані технології та енергозбереження. Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №2 – С. 89–96.
5. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Факторы, влияющие на надежность вертолетного двигателя ГТД–350, как сложной технической системы // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Харків: ХУ ПС. – 2005. – №5 – С. 26–29.
6. Курс учебно-лётной подготовки на учебном вертолете Ми-2 (КУЛП-УВ-95г). – Харьков: ХИЛ, 1995. – 104 с.
7. Анипко О.Б., Мясин В.И. Прогнозирование состояния ЛА как сложной технической системы для обоснования мероприятий по продлению ресурса или модернизации // Збірник наукових праць ХІ ВПС. – Харків: ХІ ВПС. – 2004. – №1 – С. 181–186.

### Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B., Penko E.Yu. Prognozirovanie ostatochnogo resursa ob'ektov vooruzheniya i voennoy tehniki v neraschetnykh usloviyakh ekspluatatsii Voprosyi proektirovaniya i proizvodstva konstruksiy letatelnykh apparatov. Sb. nauch. trudov Nats. aerokosmich. un-ta im. N.E. Zhukovskogo “HAI”. Harkov: NAKU “HAI”.– 2008.
2. Anipko O.B., Penko E.Yu. Statisticheskaya odnorodnost vyiborki dannyih ob otkazah pri ekspluatatsii vertoletnykh dvigateley Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. Harkiv: NTU «HPI».– 2007.– #3 – p. 37–41.

3. Anipko O.B., Penko E.Yu. Eksploatatsionnyiy tsikl aviatsionnogo dvigatelya kak kriteriy otsenki ego resursa Zbirnik naukovih prats HU PS. – Harkiv: HU PS. – 2006. – #2(8) – p. 4–6.

4. Anipko O.B., Penko E.Yu. Prognozirovanie  $\gamma$  –protsentnogo resursa vertoletnogo dvigatelya na osnovanii dannyih eksploatatsii Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Harkiv: NTU «HPI». – 2007. – #2 – p. 89–96.

5. Anipko O.B., Penko E.Yu. Faktoryi, vliyayuschie na nadezhnost vertoletnogo dvigatelya GTD–350, kak slozhnoy tehniceskoy sistemyi Zbirnik naukovih prats HU PS. – Harkiv: HU PS. – 2005. – #5 – p. 26–29.

6. Kurs uchebno-letnoy podgotovki na uchebnom vertolete Mi-2 (KULP-UV-95g). – Harkov: HIL, 1995. – 104 p.

7. Anipko O.B., Masyagin V.I. Prognozirovanie sostoyaniya LA kak slozhnoy tehniceskoy sistemyi dlya obosnovaniya meropriyatiy po prodleniyu resursa ili modernizatsii Zbirnik naukovih prats XI VPS. – Harkiv: XI VPS. – 2004. – #1 – p. 181–186.

УДК 629.735.45.036.

Аніпко О.Б., Іленко Є.Ю.

### **ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ВЕРТОЛІТНИХ ДВИГУНІВ У НЕРОЗРАХОВАНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Розроблена модель експлуатації вертолітних двигунів на основі зміни ймовірності безвідмовної роботи об'єкту від часу напрацювання. Модель використана для обґрунтування рекомендацій щодо корекції термінів проведення та обсягу заходів технічного обслуговування вертолітних двигунів ГТД-350, що експлуатуються в умовах нетипового експлуатаційного циклу. Показана можливість використання моделі для оцінки залишкового ресурсу інших авіаційних двигунів та технічних систем.

УДК 66.045.1+661.634.2

Капустенко П.А., Перевертайленко А.Ю., Хавин Г.Л., Арсеньєва О.П.

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА  
ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ**

*АО «Содружество-Т»*

Мировой рост потребления минеральных удобрений требует увеличения выпуска сырья для их производства и, в первую очередь, фосфорной кислоты. Основным сырьем промышленности минеральных удобрений является экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) и главным способом ее получения – сернокислородное разложение фосфатов.

Наиболее распространенным из экстракционных сернокислых способов получения фосфорной кислоты является дигидратный способ. Применяется также полугидратный и комбинированные способы, такие как дигидратно-полугидратный и полугидратно-дигидратный. Они различаются, прежде всего, по процессам кристаллизации сульфата кальция. В начале 80-х годов 80 % всех действующих производственных установок ЭФК (исключая СССР) работали по дигидратному способу, 1,5 % по полугидратному, 16% по полугидратно-дигидратному и 2,5 % по дигидратно-полугидратному.

Технологическая схема экстракционного отделения типового производства фосфорной кислоты по дигидратному способу из апатитового концентрата предусматривает концентрацию фосфорной кислоты путем дальнейшего выпаривания.

Основными стадиями процесса являются:

- экстракция в экстракторе (многосекционном и многомешальном), куда подается подготовленное фосфатное сырье, циркуляционная фосфорная кислота и концентрированная серная кислота (до 93 %);
- отвод тепла от образовавшейся в экстракторе пульпы осуществляется путем ее циркуляции через внешний вакуум-испаритель;
- отделение фосфорной кислоты на вакуум-фильтрах и ее подача из отделения экстракции на выпарку, где фосфорную кислоту концентрируют до содержания  $P_2O_5$  порядка 52–54 %.

Изучение стандартной схемы получения ЭФК показывает, что главный путь совершенствования и интенсификации процесса это оптимизация условий разложения фосфатов и кристаллизации сульфата кальция в реакционном объеме. Это требует совершенствования технологического процесса и улучшения аппаратного оформления основного оборудования. Однако рост цен на энергоносители и усиление экологических требований к производству заставляют обратить внимание и на работающее на производстве вспомогательное оборудование, такое как теплообменные аппараты, использующиеся в технологической цепочке в качестве подогревателей и охладителей продуктовых и вспомогательных потоков. Существующая в настоящее время тенденция замены устаревшего кожухотрубного теплообменного оборудования на пластинчатое показала, что такая замена приводит к существенной экономии средств в процессе эксплуатации, а также обладает значительной простотой в обслуживании и переналадке [1]. Кроме того, компактность пластинчатых теплообменников позволяет при их установке существенно экономить производственные площади и облегчает доступ к основному оборудованию.

Анализ общей принципиальной схемы производства ЭФК [2,3] показывает, что для схемы влажной экстракции пластинчатые теплообменные аппараты могут быть установлены на следующих позициях:

- охлаждение раствора нагретой серной кислоты (78–98 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – пластинчатый теплообменник;
- охлаждение слабоконцентрированной фосфорной кислоты (3%) после промывки осадка на фильтре – пластинчатый теплообменник;
- нагрев 30 % фосфорной кислоты перед серноокислым осаждением – спиральный или пластинчатый теплообменник;
- охлаждение фосфорной кислоты (конечного продукта) с концентрацией 40–42 % или 50–54 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  после выпаривания – пластинчатый или спиральный теплообменник;
- охлаждение скрубберной кислоты (8–11%  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ );
- выпаривание фосфорной кислоты;
- охлаждение воды, орошающей барометрические конденсаторы смешения в технологической схеме выпарной станции.

Серная кислота (33–35 т/ч в расчете на моногидрат) с концентрацией 92,5 % (или 75 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), разбавленную до 55–57 % охлаждают в графитовых холодильниках до 50–70 °C и подают через распределительную коробку в первые три отделения экстрактора [2]. На этой позиции графитовый теплообменник (блочный или кожухотрубный) можно заменить на пластинчатый разборный. Охлаждение раствора нагретой серной кислоты, используемой в технологической схеме, диктуется потребностями ее многократного использования в процессе. Охлаждаемая серная кислота чистая, поэтому особых проблем с загрязнением поверхности пластин не должно возникать.

При расчетах наиболее важным моментом является выбор материала пластин и прокладок в аппарате, который зависит от температуры и концентрации кислоты. Область применения материалов пластин при охлаждении серной кислоты различной концентрации в зависимости от температуры серной кислоты представлена на рис. 1.

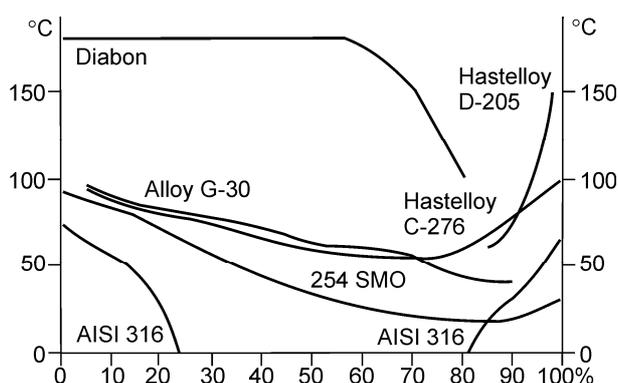


Рисунок 1 – Применение различных материалов пластин при работе с серной кислотой различной концентрации в зависимости от температуры серной кислоты

Из данных на рисунке можно заключить, что если, к примеру, концентрация составляет 90–99 %, то возможно применение различных материалов, которые гарантируют работу аппарата. Поэтому для выбора необходимо обратиться к руководству фирм-изготовителей пластин (теплообменников) для серной кислоты. Если концентрация между 70–90 %, то для всех температур возможно применение диабонов F100, NS1 или NS2, т.е. графитовых.

Содержание различных металлов в сплавах, из которых изготавливаются пластины, по данным фирмы «Альфа Лафаль» представлено в табл. 1.

Таблица 1 – Содержание различных металлов в сплавах

Сплав	Металлы, %				
	Cr	Nickel	Mo	Cu	Другие
AISI 316	17,0	12,0	2,0	-	
Avesta 254 SMO	20,0	18,0	6,1	1,7	N 0,2
Alloy C276	15,5	58,0	16,0	-	W
Hastelloy C22	21,0	44,0	17,5	-	W 3, Fe 2-6
Hastelloy G30	29,5	40,0	5,0	1,7	W 2,5, Fe 18-21
Hastelloy D205	20,0	64,5	2,5	2,0	Si 5, Fe 6

Охлаждение слабоконцентрированной фосфорной кислоты это приложение пластинчатого аппарата для охлаждения  $P_2O_5$  с концентрацией до 3 % водой после промывки осадка на фильтре. Наиболее характерные данные для расчетов на этой позиции заключаются в охлаждении фосфорной кислоты с  $50\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 25\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$  и нагрев воды с  $20\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 30\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}$ .

На эти данные вполне достаточно рассчитать стандартный пластинчатый теплообменник с пластинами из сплава AISI 316 или SMO и прокладки из синтетической резины EPDM. Учитывая, что при работе аппарата на этой позиции возможно усиление эффекта загрязнения теплопередающей поверхности, то расчет теплообменника лучше производить с запасом по коэффициенту теплопередачи 10% (margin 10%) и контролировать величину касательного напряжения на стенке пластин по стороне фосфорной кислоты не менее  $\tau > 50$  Па.

Нагрев 30 % фосфорной кислоты перед сернокислым осаждением производится с температуры  $20\text{ }^\circ\text{C}$  до  $40\text{ }^\circ\text{C}$  горячей водой с начальной температурой  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Нагреваемая кислота имеет очень сильную склонность к отложению на теплопередающей поверхности гипса и фторидов. Поэтому в зависимости от исходного сырья (размера и количества частиц) на этой позиции можно использовать пластинчатый или спиральный теплообменник.

При использовании пластинчатого теплообменника материал пластин выбирается в зависимости от концентрации кислоты, ее температуры, количества и состава примесей. Присутствие Cl, F,  $H_2SO_4$  уменьшают сопротивление металла пластин коррозии, наличие Fe и Al наоборот усиливают сопротивление.

В любом случае для выбора пластинчатого или спирального аппарата очень важно знать содержание гипса в кислоте. На основе имеющегося опыта эксплуатации можно рекомендовать выбор материала теплопередающей поверхности: для кислоты с 50 %  $P_2O_5$  при температуре  $< 85\text{ }^\circ\text{C}$ , при наличии примесей 1% HF,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , 4%  $H_2SO_4$ , 600 ppm HCl необходимо выбирать 254 SMO. Для кислоты с 50 %  $P_2O_5$ , с наличием примесей выше приведенных ограничений, необходимо применять материал G30 или графит. В качестве материала прокладок – EPDM. Для нагрева кислоты на этой позиции можно использовать спиральный теплообменный аппарат, с паром в качестве греющего теплоносителя.

Охлаждение конечного продукта – фосфорной кислоты с концентрацией 40–42 % или 50–54 %  $P_2O_5$  производится в соответствие с температурным режимом, указанным в табл. 2.

Таблица 2 – Начальная и конечная температура теплоносителей

Теплоноситель	Температурный интервал
Вода	50 °C → 37 °C
30 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40 °C ← 20 °C
54 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	85 °C → 55 °C
54 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	55 °C → 25 °C

Эти процессы также сопровождаются высоким риском выпадения на теплопередающей поверхности гипса и фторидов. При высоком содержании гипса рекомендуется устанавливать либо ширококанальный пластинчатый аппарат с широким каналом по стороне кислоты (Wide Gap), либо спиральный теплообменник.

При выборе ширококанального аппарата необходимо максимально учитывать вероятность высокой интенсивности загрязнения. Для этого расчет теплообменника обязательно производить с запасом по коэффициенту теплопередачи не менее 10 % (margin 10 %) и контролировать величину касательного напряжения на стенке пластин по стороне фосфорной кислоты не менее  $\tau > 50$  Па.

При выборе спирального аппарата в качестве материала теплопередающей поверхности используют: AISI 316L, 904L, 254 SMO, Sanicro 28, C-276, G30 (в порядке возрастания); прокладки – MS2000 (клингерсил), PTFE (в порядке возрастания). Минимальный зазор между спиральями по обеим сторонам – 10 мм; фактор загрязнения – 0,001. Зазор равный по обеим сторонам дает возможность переключения сторон кислоты и воды для промывки. Водой можно чистить сторону кислоты, а кислотой растворять налет на поверхности пластин по стороне воды.

В процессе проектирования спирального аппарата необходимо контролировать температуру стенки по стороне кислоты, не допуская увеличения скорости коррозии для горячего конца аппарата. Скорость по стороне кислоты должна быть выше 1 м/с (во избежание отложений на стенке) и ниже 1,5 м/с, так как при более высокой скорости величина коррозии очень резко возрастает.

В качестве проектного расчета теплообменников на охлаждение и нагрев концентрированной фосфорной кислоты были рассмотрена позиция охлаждения готового продукта 54 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> концентрации и нагрев фосфорной кислотой 30 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> концентрации, табл. 2. Содержание примесей в теплоносителях принималось в соответствии с данными табл. 3.

Таблица 3 – Характеристика водного раствора фосфорной кислоты

Основные элементы, %	30 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	54 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29,8	53,0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,9	2,0
SO <sub>3</sub>	1,6	2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	0,24
F	0,9	0,4
SiO <sub>2</sub>	0,3	0,03
Cl, ppm	755	165

Физические свойства взаимодействующих сред (фосфорной кислоты) для концентрации 54 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и 30 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> представлены в таблице 4.

Таблиця 4 – Теплофізические свойства растворов фосфорной кислоты при различной концентрации и температуре

Среда 1: физические свойства при трех температурах – фосфорная кислота 54% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
Температура, °С	T <sub>1</sub> = 85	T <sub>2</sub> = 70	T <sub>3</sub> = 55
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1335	1346	1357
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°К)	2,659	2,639	2,612
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,546	0,535	0,520
Динамическая вязкость, сПз	1,122	1,506	2,753
Среда 1: физические свойства при трех температурах – фосфорная кислота 54% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
Температура, °С	T <sub>1</sub> = 55	T <sub>2</sub> = 40	T <sub>3</sub> = 25
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1357	1366	1376
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°К)	2,612	2,577	2,535
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,520	0,503	0,483
Динамическая вязкость, сПз	2,753	4,862	7,832
Среда 2: физические свойства при трех температурах – фосфорная кислота 30% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
Температура, °С	T <sub>1</sub> = 20	T <sub>2</sub> = 30	T <sub>3</sub> = 40
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1181	1176	1171
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°К)	3,237	3,262	3,284
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,533	0,547	0,560
Динамическая вязкость, сПз	2,996	2,310	1,738

Охлаждение готового продукта производится в две ступени. На первой ступени концентрированная кислота 54 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> охлаждается водой с температуры 85 °С до 55 °С и далее на второй ступени с 55 °С до 25 °С. Данные для расчета теплообменников 1-й и 2-й ступени представлены в табл. 5.

Для установки на данной позиции были выбраны теплообменники шведской фирмы «Альфа Лаваль». В качестве материала пластин для таких коррозионно-активных сред как фосфорная кислота принят сплав Hastelloy G30, металловедческий состав которого приведен в табл. 1. Характерной особенностью данного материала является самое высокое содержание хрома, достаточно высокое содержание молибдена и вольфрама. Минимальная толщина пластин из этого материала составляет 0,6 мм. В качестве материала прокладок для пластинчатых аппаратов на фосфорную кислоту следует применять синтетическую резину EPDMCT. Способ крепления – CLIP-ON (безклеевой). Направление движения теплоносителей – противоточное. Расчеты проводились с учетом запаса по коэффициенту теплопередачи 10 %. В результате для первой ступени к установке можно принять разборный пластинчатые аппараты марки M10-BFM с диаметром коллекторов 100 мм, для второй – M15-BFM с диаметром коллекторов 150 мм. Результаты расчетов аппаратов для первой ступени и второй ступени представлены в табл. 6.

Нагрев фосфорной кислоты 30 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> производится водой, данные для расчета теплообменника на этой позиции представлены в табл. 5, а результаты проектирования аппарата в табл. 6.

Таблица 5 – Данные для расчета теплообменников 1-й и 2-й ступени охлаждения 54 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и нагрева 30 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

1-я ступень	Тепловая нагрузка Q = 879,6 кВт	
Теплоноситель	Греющий	Нагреваемый
Среда	54% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Вода
Рабочее давление, МПа	P <sub>1</sub> = 0,5	P <sub>2</sub> = 0,5
Расход, кг/ч	G <sub>1</sub> = 40 000	G <sub>2</sub> = 30 300
Входная температура, °С	T <sub>1</sub> = 85	T <sub>3</sub> = 25
Выходная температура, °С	T <sub>2</sub> = 55	T <sub>4</sub> ≤ 50
Потери давления, МПа	ΔP <sub>1</sub> ≤ 0,1	ΔP <sub>2</sub> ≤ 0,1
2-я ступень	Тепловая нагрузка Q = 858,6 кВт	
Теплоноситель	Греющий	Нагреваемый
Среда	54% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Вода
Рабочее давление, МПа	P <sub>1</sub> = 0,5	P <sub>2</sub> = 0,5
Расход, кг/ч	G <sub>1</sub> = 40 000	G <sub>2</sub> = 37 000
Входная температура, °С	T <sub>1</sub> = 55	T <sub>3</sub> = 20
Выходная температура, °С	T <sub>2</sub> = 25	T <sub>4</sub> ≤ 40
Потери давления, МПа	ΔP <sub>1</sub> ≤ 0,1	ΔP <sub>2</sub> ≤ 0,1
Нагрев 30% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Тепловая нагрузка Q = 906,0 кВт	
Теплоноситель	Греющий	Нагреваемый
Среда	Вода	30% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Рабочее давление, МПа	P <sub>1</sub> = 0,5	P <sub>2</sub> = 0,5
Расход, кг/ч	G <sub>1</sub> = 60 000	G <sub>2</sub> = 50 000
Входная температура, °С	T <sub>1</sub> = 50	T <sub>3</sub> = 20
Выходная температура, °С	T <sub>2</sub> = 37	T <sub>4</sub> ≤ 40
Потери давления, МПа	ΔP <sub>1</sub> ≤ 0,1	ΔP <sub>2</sub> ≤ 0,1

Таблица 6 – Результаты расчета теплообменников для первой, второй ступеней и нагрева 30 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Марка аппарата	Компоновка	Число пластин	Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	Падение давления (горячая сторона), кПа	Падение давления (холодная сторона), кПа
1-я ступень					
M10-BFM	1×13ML/1×13MH	26	6,0	67,6	58,9
2-я ступень					
M15-BFM	1×25H/1×24H	50	29,8	82,9	79,8
Нагрев 30% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>					
M10-BFM	1×33H/1×33H	67	16,1	95,0	61,0

Одним из наиболее важных приложений для пластинчатого теплообменного аппарата является его использование в качестве оборудования для охлаждения кислоты скруббера 8–11 %  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ . Охлаждение кислоты  $\text{H}_3\text{SiF}_6$  производится водой с 50 °С до 37 °С. В качестве материала аппаратов можно использовать 245 SMO и C-276 с прокладками из EPDM. Можно использовать рекомендации по расчету и проектированию для предыдущих позиций нагрева и охлаждения концентрированной фосфорной кислоты.

#### Концентрирование (выпаривание) фосфорной кислоты

Выпаривание воды при концентрировании фосфорной кислоты осложняется очень сильной коррозией оборудования и выделением примесей, имеющихся в кислоте. Горячая фосфорная кислота разъедает большинство известных металлов, сплавов и керамик. Кроме этого, эти процессы резко усиливаются в присутствии небольшого количества серной кислоты. В качестве материала оборудования применяются различные марки графитов, которые могут работать вплоть до температуры 150 °С с кислотами 61,5 % концентрации  $\text{P}_2\text{O}_5$  [4].

Наибольшую трудность представляют осадки, возникающие при выпаривании, и отложение которых приводит к резкой потере работоспособности оборудования. Отложения обычно состоят из сульфатов и фосфатов кальция, железа и алюминия, фторида и кремнефторида кальция. Количество и состав отложений зависит от условий получения фосфорной кислоты и начального состава сырья. Главное свойство фосфорной кислоты по отношению к содержанию в ней примесей состоит в том, что с увеличением концентрации и понижением температуры уменьшается растворимость в ней различных примесей, что приводит к увеличению выпадения примесей в осадок.

Для кислоты перед упариванием (концентрация 28–32 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) основными примесями являются сульфат кальция и кремнефторид натрия (при небольших количествах комплексных кремнефторидов). В упаренной кислоте (концентрация 50–54 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) содержатся твердые примеси в виде ангидрита, полугидрата и смеси изоморфных однозамещенных ортофосфатов железа, алюминия и кальция [5]. Состав отложения, который откладывается на оборудовании при концентрировании фосфорной кислоты в основном такой же, какой выделяется из упаренной кислоты [2].

Главным фактором, сдерживающим возможность концентрирования кислоты, является содержание примесей в сырье и экстракционной кислоте. Кислота с концентрацией 50–54 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  может быть получена из апатитового концентрата или обогащенных высокосортных фосфатов.

В настоящее время выпарку экстракционной фосфорной кислоты производят в аппаратах с паровым обогревом или с непосредственным обогревом топочными газами. На рис. 2 представлена схема одной из четырех параллельно работающих одноступенчатых вакуум-выпарных установок для типового завода по производству экстракционной кислоты. Выпаривание производится с 28–29 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  до 52–54 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Работа под разрежением протекает при пониженной температуре 70–90 °С, что существенно образом сказывается на снижении коррозии и позволяет использовать сбросный пар сернокислого производства.

Выпарные станции оборудованы графитовыми кожухотрубными выпарными аппаратами, которые легко забиваются. Собственно аппараты работают таким образом, что производится не выпаривание, а нагревание кислоты в графитовом кожухотрубча-



ности нагрева составляет 39–45 кг/ч. Таким образом, при выпаривании на 1 т  $P_2O_5$  необходимо испарить около 1,3 т воды и затратить на это 1,6–1,7 т греющего пара.

В процессе эксплуатации графитового блочного теплообменника происходит инкрустация каналов и аппарат останавливают после 5–7 дней работы для чистки и промывки. Каналы теплообменников промывают 2–4 % раствором хромнефтефтористоводородной кислоты. Очистка аппарата весьма затруднена и должна проводиться очень осторожно из-за повышенной хрупкости графита. Из экспериментальных наблюдений известно [7], что за 5–6 суток эксплуатации коэффициент теплопередачи снижается на 325–420 кДж/(м<sup>2</sup>·ч·К). При обработке всего выпариваемого потока затравочными кристаллами снижение коэффициента теплопередачи через 12 суток составляет примерно 100 кДж/(м<sup>2</sup>·ч·К), что в 3–4 раза меньше [7]. По данным работы [2] скорость накипеобразования составляет не более 0,25–0,3 мм в месяц, в то время как слой отложений в 160 трубках составил 0,2–0,5 мм и 1–5 мм в 100 трубках и полностью забиты 48 трубок через 7 суток работы по обычному режиму. Это явно показывает целесообразность обработки кислоты затравочными кристаллами, которые позволяют сосредоточить отложения в объеме жидкости, и продлить срок эксплуатации выпарного аппарата между чистками до 2–3 месяцев.

Главный недостаток циркуляционной системы состоит в перекачивании больших расходов кислоты, а также частые остановки на чистку поверхности теплообмена и довольно в сильном загрязнении продукта для низкокачественного сырья. Например [6], для чилисайского флотационного концентрата при концентрировании до 40–43 %  $P_2O_5$  используется вакуум-аппарат с принудительной зоной циркуляции и вынесенной зоной кипения неосветленной обесфторенной кислоты. При скорости циркуляции 2,5–3 м/с срок работы аппарата между чистками составляет 3–4 суток.

В общем случае при упаривании фосфорной кислоты с 30 до 54 % в вакуум-аппаратах расходуется в расчете на 1 т  $P_2O_5$  в зависимости от производительности 10–15 кВт·ч электроэнергии; 1,8–1,9 т пара и 40–75 м<sup>3</sup> воды при температуре 18 °С.

#### Пластинчатые теплообменные аппараты в качестве оборудования концентрирования фосфорной кислоты

В настоящее время пластинчатые выпарные аппараты не нашли широкого применения в качестве оборудования концентрирования фосфорной кислоты, так как не существует металлического материала, который мог бы противостоять коррозионным явлениям и загрязнению поверхности для заданных условий эксплуатации. В этом направлении проводятся значительные теоретические и экспериментальные исследования различными фирмами-изготовителями пластинчатого теплообменного оборудования. Главным препятствием является интенсивная инкрустация теплопередающей поверхности, коррозия стенок и закупоривание каналов рыхлым осадком сульфата кальция, кремнефторидов натрия, калия и фосфатов полуторных окислов.

Существует пример промышленного внедрения пластинчатых обогревателей французской фирмой «Speischime». Был установлен пластинчатый подогреватель с пластинами 4550×1575×892 мм из нержавеющей стали толщиной 12 мм, покрытый слоем эбонита толщиной 5 мм и резины – 6 мм. Поверхность теплообмена подогревателя – 172 м<sup>2</sup>. Обогрев осуществляется паром под давлением 1,3 МПа (133 °С). Подогреватель соединен со стальным гуммированным вакуум-испарителем высотой 8,23 м и диаметром 3, 25 м [2].

Расчетная производительность установленных параллельно трех выпарных аппаратов составляла 340 т  $P_2O_5$  в сутки (по выпаренной воде 16,83 т/ч) при концентрировании кислоты с 32 до 54 %  $P_2O_5$ . Однако уже в первый период эксплуатации их работа стала неэффективной из-за значительных отложений на теплопередающей поверхности и забивки каналов рыхлым осадком. Кроме того, из испарителя вместе с паром уносилось много брызг фосфорной кислоты, которая полностью переходила в кремнефтористую кислоту [2].

Однако в технологической схеме выпарных установок фосфорной кислоты с целью уменьшения инкрустации и закупоривания труб уже нашли широкое применение различные способы, среди которых наибольшее распространение получили схемы с рециркуляцией шлама и использование вакуум-аппаратов с кристаллизатором. Схема с рециркуляцией шлама позволяет получить готовый осветленный продукт. Для этого из упаренной кислоты отделяют на центрифуге нерастворимые частицы и возвращают их в отстойник-питатель, куда подают поступающую на концентрирование кислоту низкой концентрации. Часть продукта из центрифуги (10–35 %) подают в питательный бак установки в качестве зародышей кристаллизации. Осадок из отстойника подают в экстрактор или на вакуум-фильтр, а фугат (жидкость) в выпарной аппарат. Обработанная таким образом кислота содержит до 0,6 % твердых частиц.

Необходимо остановиться на некоторых свойствах и особенностях фосфорной кислоты различной концентрации, полученной из разных сырьевых источников. Фосфорная кислота с повышением концентрации резко увеличивает свою вязкость. Кислота из апатитового концентрата с концентрацией 52,5 %  $P_2O_5$  имеет вязкость примерно 30 сП и в остывшем состоянии представляет собой неподвижную густую массу. Кислоты из низкокачественных фосфоритов с концентрацией 40–45 % после охлаждения представляют собой густую кашеобразную массу. Причем, например, кислота из фосфатов Каратау вообще может быть упарена только до концентрации 37–38 % из-за высокого содержания солей. Температура упаривания кислоты, полученной из чилисайских фосфоритов, в интервале концентраций от 20 до 51 %  $P_2O_5$  и от 51 до 53 %  $P_2O_5$ , повышается по сравнению с чистыми растворами, соответственно, на 15–20 и 25–33 °С. Такие высокие показания вязкости и ярко выраженная зависимость от температуры и концентрации, делают проектирование пластинчатых аппаратов на данной позиции весьма сложным и ответственным процессом.

Другой способ уменьшения инкрустации в вакуум-аппаратах заключается в установке в циркуляционном контуре специальной емкости для кристаллизации основной массы примесей и укрупнения их частиц. Для этого сконцентрированный раствор в вакуум-аппарате через центральную циркуляционную трубу попадает в расположенный под испарителем кристаллизатор. Здесь, начавшееся в выносном кипятильнике выделение зародышей кристаллов, продолжается и сопровождается ростом кристаллов. Наиболее крупные опускаются на дно аппарата, откуда их выводят и отфильтровывают от кислоты. По данным [2] суточная производительность установки из трех последовательно соединенных аппаратов составляет 360 т  $P_2O_5$  (22 т выпаренной воды в 1 ч) и такая установка может работать до 30 суток от чистки до чистки.

Начальные капиталовложения такого вакуум-аппарата на 25 % больше, чем у обычного. Однако эти затраты компенсируются более длинным периодом работы и облегчением операций хранения продукционной кислоты и ее использования. С увеличением суточной производительности системы от 150 до 450 т  $P_2O_5$  при концентрирова-

нии с 30 до 54 %  $P_2O_5$ , капитальные удельные затраты в расчете на 1 т  $P_2O_5$ , снижаются на 25 %, а эксплуатационные – на 10–15 %.

Ведущий производитель пластинчатого теплообменного оборудования компания «Альфа Лаваль» предложила способ уменьшения инкрустации пластин и их коррозии путем предварительного отфуговывания 30 %  $P_2O_5$  фосфорной кислоты перед выпариванием. Для этой операции с высокой эффективностью можно использовать декантерную центрифугу «Альфа Лаваль», которая может уменьшить содержание гипса с 1–14 % веса до 0,1–1,0 %; остаток (кек) содержащий 50–70 % веса твердого продукта. Это позволяет применить на данной позиции новое пластинчатое оборудование, увеличить экономическую эффективность производства и уменьшить простои для повседневного обслуживания.

Для этой цели рекомендуется центрифуга с выгрузкой осадка через сопло. Характерной особенностью здесь является требование низкого содержания взвешенных частиц в кислоте, но при этом имеет место высокая скорость изнашивания выпускного сопла и дискового пакета.

### Охлаждение воды, орошающей барометрические конденсаторы смешения

В работающих выпарных установках для получения вакуума в выпарных аппаратах вторичный пар необходимо сконденсировать. Для этого используют два типа конденсаторов: конденсаторы смешения и поверхностные конденсаторы. В конденсаторах смешения пар непосредственно смешивается с водой. В поверхностных конденсаторах пар конденсируется путем охлаждения через стенку.

Применяют пластинчатые и кожухотрубчатые поверхностные конденсаторы. Считается, что конденсаторы такого типа наиболее целесообразно использовать в следующих случаях:

- когда предъявляется требование получения абсолютно чистого конденсата вторичного пара;
- если в паре содержатся агрессивные вещества, загрязняющие промышленные стоки;
- когда в качестве охлаждающего теплоносителя используется исходный раствор.

Во всех остальных случаях рекомендуется применять конденсаторы смешения. На выпарных установках используются большие барометрические конденсаторы, для конденсации пара. Для этого процесса используется вода, которая циркулирует между барометрическим конденсатором и градирней, которая таким образом отводит тепло в окружающую среду от каждого корпуса выпарной станции. Во многих промышленных установках охлаждающая вода после конденсатора смешения идет в сток, т.е. имеет место открытая схема охлаждения. Такой схеме присущи следующие недостатки:

- высокий расход чистой воды с безвозвратной ее потерей в большинстве случаев;
- зависимость работы конденсатора смешения от температуры воды (особенно в летнее время), что вызывает неустойчивую работу вакуумной системы, и, как следствие, всей выпарной установки;
- загрязнение промышленных стоков, особенно в случае присутствия агрессивных или химически активных компонентов.

Все это делает необходимым произвести замену прямоточной схемы с потерей воды на циркуляционную схему с оборотной водой. Принципиально циркуляционная схема представлена на рис. 3.

В качестве исходных данных примем, что входная температура воды в конденсатор смешения равна примерно 25 °С, выходная примерно 38 °С. Таким образом в теплообменнике необходимо охладить  $G_w$  кг/ч воды от температуры 38 °С до 25 °С. Особенностью оборотной воды для конденсатора смешения является наличие в ней различных примесей, например, в производстве фосфорной кислоты это остатки фосфогипса, фтористые соединения и т.д. При проектировании теплообменника охладителя оборотной воды данное обстоятельство требует особого внимания проектировщика. С точки зрения охраны окружающей среды негативное действие оказывает фтор, который попадает в градирню. Исследования по утилизации двух барометрических конденсаторов в закрытом циркуляционном цикле, позволяют уменьшить содержание фтора в градирне более чем на 50 %.



Рисунок 3 – Узел барометрического конденсатора с охлаждением воды в наружном теплообменнике

На данную позицию охлаждения оборотной воды были рассчитаны пластинчатые и спиральные теплообменники производства фирмы «Альфа Лаваль», пластины которого изготовлены из сплава Hastelloy G30 толщиной 0,6 мм с прокладками EPDMCT. Такой выбор марки материала связан с присутствием в оборотной воде остатков фосфогипса и фтористых соединений. При расчете аппарата принимался запас на возможное загрязнение теплопередающей поверхности пластин в процессе эксплуатации – 20 % и контролировалась значение касательного напряжения на стенке пластин не менее 50 кПа, что является косвенным подтверждением сохранения работоспособности теплопередающей поверхности пластин в течение эксплуатационного периода. Данные расчетов представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Исходные данные для проектирования теплообменников для охлаждения циркуляционной воды барометрического конденсатора смешения (рис. 3)

Среда	Параметры				
	$t_{\text{вход}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{выход}}, ^\circ\text{C}$	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Потери давления, кПа	Запас, %
Вода барометрического конденсатора	38	25	368	150	20
Охлаждающая вода	20	30	475	150	20

В результате проектирования были рассчитаны три типа аппаратов (два установленных параллельно): традиционный разборный пластинчатый теплообменник, спиральный теплообменный аппарат и ширококанальный пластинчатый разборный теплообменник, с широким каналом по стороне охлаждаемой циркуляционной воды барометрического конденсатора. Результаты расчетов по основным параметрам представлены в табл. 7.

Таблица 7 – Данные проектирования теплообменников для охлаждения циркуляционной воды барометрического конденсатора смешения (рис. 3), при использовании в качестве охлаждающей среды воды

Марка теплообменника	Количество	Компоновка	Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	Потери давления, кПа		Запас, %
				Горячая сторона	Холодная сторона	
M15M	2	2×(37MH+7L) /2×(37ML+7L)	107,9	92	145	21
T20M	1	1×135H/ 1×135H	230,4	55,5	92,4	20
T20M	2	1×68H/ 1×68H	117,3	50,5	81,8	20
M30M	1	1×(32H+24ML) /1×(32H+24MH)	204,2	86,9	146	20
WG200	2	3×14SH+4×15SH /1×33NH+2×34NH	161,2	149	79	21
SHE	2	1H-L-1T	286,3	137	143,6	20

Анализируя данные из табл. 7 можно сделать следующие выводы. Наиболее приемлемым является установка одного аппарата марки M30M, параллельная установка двух теплообменников марки T20M или двух ширококанальных аппаратов WG200. Установка двух аппаратов хотя и обходится дороже, однако имеет некоторую возможность резервирования, что позволяет, например, увеличить расход охлаждающего теплоносителя, производить чистку одного аппарата без остановки другого или работать с одним аппаратом при снижении мощности в аварийном режиме. Установка аппаратов марки M15M возможна, однако это двухходовые аппараты, которые могут быть более подвержены отложению на пластинах и требуют гораздо больше усилий при их чистке, т.к. присоединения находятся не только на неподвижной, но и на прижимной плите. Использование спирального теплообменника SHE 1H-L-1T хотя и сулит стабильную работу с минимальным загрязнением теплопередающей поверхности, однако имеет слишком большую теплопередающую поверхность и, следовательно, высокую стоимость (примерно в 4 раз дороже ширококанального и в 8 раз традиционного). Из двух марок аппаратов T20M и WG200 предпочтение следует, по всей видимости, отдать T20M как менее дорогому.

При работе в летний период или при возникновении нештатной ситуации может произойти повышение температуры охлаждающей внешней воды. Поэтому логично будет предусмотреть возникновение такой ситуации на стадии проектирования теплообменника. Учесть при проектировании возможность обеспечения теплообменником своих функций можно двумя способами. Во-первых, предусмотреть увеличение расхода охлаждающей воды через аппарат, во-вторых, запроектировать аппарат с максимально возможным температурным сближением. В данном случае входная температура охлаждающей воды должна быть задана как можно ближе к выходной температуре во-

ды барометрического конденсатора, которая по условиям проектирования (табл. 6) равна 25 °С. Уменьшение температурного сближения приводит к увеличению площади теплопередающей (и общей) поверхности теплообменника и, в конце концов, поверхность аппарата настолько возрастает, что проектирование такого теплообменника является нецелесообразным по экономическим и техническим причинам. На рис. 4 представлена зависимость общей площади теплопередающей поверхности  $F_{all}$ , м<sup>2</sup> теплообменника марки М30-MFG от входной температуры охлаждающей воды  $t_{inlet}$  при остальных неизменных параметрах расчета (табл. 6, margin принималось равным нулю).

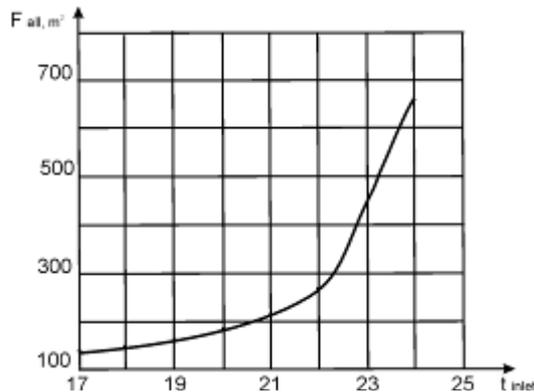


Рисунок 4 – Зависимость общей площади теплопередающей поверхности от входной температуры охлаждающей воды

Из графика можно видеть, что при проектировании с входной температурой охлаждающей воды 21 °С общая площадь теплообменника становится больше 200 м<sup>2</sup>. Дальнейшее сближение приводит к резкому росту теплопередающей поверхности.

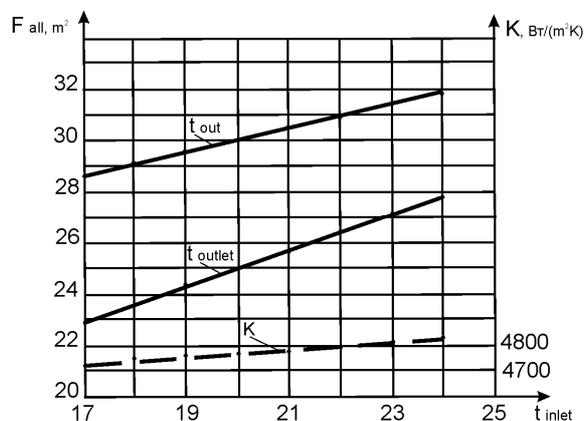


Рисунок 5 – Зависимость температуры охлаждающей воды  $t_{out}$ , выходной температуры воды барометрического конденсатора  $t_{outlet}$  и коэффициента теплопередачи  $K$  от значения входной температуры охлаждающей воды внешнего контура

На рис. 5 показано изменение выходной температуры охлаждающей воды  $t_{out}$ , выходной температуры воды барометрического конденсатора  $t_{outlet}$  и коэффициента теплопередачи  $K$  в зависимости от значения входной температуры охлаждающей воды внешнего контура.

Увеличение расхода охлаждающей воды через теплообменник связано со значительными трудностями. Во-первых, заводы по производству фосфорной кислоты на

практике установлены в такой местности, где дефицит воды, и особенно в летний период, является обычным явлением. Во-вторых, увеличение расхода требует установки теплообменников с коллекторами и присоединениями, которые могут пропустить большой расход. В этом смысле правильным выбором будет теплообменник M30-MFG или два аппарата T20-MFG в параллель. Однако стоимость одного аппарата M30-MFG будет меньше, что и решает выбор в пользу теплообменника такой марки. В-третьих, какой бы теплообменник не был бы установлен, с увеличением температуры охлаждающей воды свыше 24 °С, условие охлаждения воды барометрического конденсатора до температуры 25 °С, вряд ли будет выполняться.

#### Поверхностный барометрический конденсатор

В современных химических производствах существует устойчивая тенденция замены конденсаторов смешения на поверхностные конденсаторы, и особенно пластинчатые. Это связано, прежде всего, с теми положительными сторонами такой замены, к которым можно отнести:

- установка пластинчатого конденсатора обеспечивает быстрое реагирование на изменения в системе барометрического конденсатора;
- экономия свежей воды;
- компактность установки, простота обслуживания и эксплуатации.

К недостаткам обычно относят загрязнение поверхности пластин в процессе эксплуатации, отвод неконденсирующихся газов и необходимость обеспечения малых потерь давления в аппарате, работающем под вакуумом. В табл. 9 представлены исходные данные для проектирования поверхностного (пластинчатого) барометрического конденсатора.

Таблица 8 – Исходные данные для проектирования теплообменников для охлаждения циркуляционной воды барометрического конденсатора смешения (рис. 3) для случая повышения температуры охлаждающей воды до 30 °С.

Среда	Параметры				
	$t_{\text{вход}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{выход}}, ^\circ\text{C}$	Расход, м <sup>3</sup> /ч	Потери давления, кПа	Запас, %
Вода барометрического конденсатора	38	33	368	150	20
Охлаждающая вода	30	35	475	150	20

Таблица 9 – Исходные данные для проектирования поверхностного (пластинчатого) барометрического конденсатора

Среда	Параметры				
	$t_{\text{вход}}, ^\circ\text{C}$ (пар)	$t_{\text{выход}}, ^\circ\text{C}$ (конденсат)	Расход, кг/ч	Потери давления, кПа	Запас, %
Пар	45	38	6322	3	-
Охлаждающая вода	20	30	364 900	150	-

В результате проведенных расчетов к установке может быть принят специальный пластинчатый конденсатор AlfaCond 600, с пластиной толщиной 0,6 мм, изготовленной из сплава Hastelloy G-30. Установка этого конденсатора объясняется, в первую очередь, большим расходом пара через присоединения. Для того чтобы пропустить такое количество пара при помощи аппаратов других типов с коллекторами диаметром

200 и 300 мм требуется установка нескольких теплообменников параллельно. Специальный конденсатор AlfaCond 600 имеет коллектор по пару диаметром 600 мм и позволяет пропустить расход пара с приемлемой скоростью. Результаты расчета аппарата AlfaCond 600 представлены в табл. 10.

Таблица 10 – Данные проектирования пластинчатого барометрического конденсатора

Марка теплообменника	Компоновка	Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	Потери давления, кПа	
			Горячая сторона	Холодная сторона
Alfa Cond 600	1×50LG/ 1×50LW	191,1	1,1	5,8

Представленное моделирование узла охлаждения циркуляционной воды барометрического конденсатора смешения с пластинчатым теплообменником, показывает возможность применения поверхностных конденсаторов вместо конденсаторов смешения. Предложенные технические решения применимы для стадий концентрирования экстракционной фосфорной кислоты для различных процессов ее производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта ЕСОРНОS, контракт № INCO-СТ-2005-013359.

#### Литература

1. Пластинчатые теплообменники в промышленности / Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2004.– 232 с
2. Копылев Б.А. Технология экстракционной фосфорной кислоты.– Л.: Химия, 1981.– 224 с.
3. Технология фосфорных и комплексных удобрений / Под ред. Эвенчика С.Д., Бродского А.А.– М.: Химия, 1987.– 452 с.
4. Антонов А.М., Фокин М.Н., Воробьева Н.Ф. // ЖПХ, 1977.– Т.50, №10.– С. 2271–2274.
5. Варшавский В.Л. и др. // Хим. промышленность, 1974.– №5.– С. 602–604.
6. Промышленность минеральных удобрений и серной кислоты.– М.: НИИТЭ-ХИМ, 1978.– 4.– С. 10–12.
7. Коробанов В.Н. и др. // Хим. промышленность, 1978.– №5.– С. 358–359.

#### Bibliography (transliterated)

1. Plastinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. – Harkov: NTU „HPI”, 2004.– 232 p.
2. Kopylev B.A. Tehnologiya ekstraktsionnoy fosfornoй kisloty.– L.: Himiya, 1981.– 224 p.
3. Tehnologiya fosfornyih i kompleksnyih udobreniy Pod red. Evenchika S.D., Brodskogo A.A.– M.: Himiya, 1987.– 452 p.
4. Antonov A.M., Fokin M.N., Vorobeва N.F. ZhPH, 1977.– T.50, #10.– p. 2271–2274.
5. Varshavskiy V.L. i dr. Him. promyishlennost, 1974.– #5.– p. 602–604.
6. Promyishlennost mineralnyih udobreniy i sernoy kisloty.– M.: NIITE-HIM, 1978.– 4.– p. 10–12.
7. Korobanov V.N. i dr. Him. promyishlennost, 1978.– #5.– p. 358–359.

УДК 66.045.1+661.634.2

Капустенко П.О., Перевертайленко О.Ю., Хавін Г.Л., Арсеньєва О.П.

**АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПЛАСТИНЧАСТОГО  
ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА  
ЕКСТРАКЦІЙНОЇ ФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ**

Розглянуто проблему модернізації обладнання заводу по виробництву екстракційної фосфорної кислоти. Наведені позиції, на яких доцільно встановлювати сучасне пластинчасте теплообмінне обладнання. Особлива увага приділена відділенню концентрації фосфорної кислоти (випарювання). Розглянуто сучасне становище і перспективи використання пластинчастого випарного обладнання. Наведено схему заміни відкритої схеми живлення барометричного конденсатора на закриту, з використанням пластинчастого теплообмінного апарату для охолодження води на барометричний конденсатора.

Форись С.Н., Федоров С.С., Федоров О.Г.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ГАЗА НА РАБОТУ ШАХТНЫХ ИЗВЕСТКОВО-ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Одним из энергоемких процессов в металлургии является известково-обжиговое производство. До 30 % извести получают в газовых противоточных шахтных печах, удельный расход топлива в которых составляет 140÷150 кг у.т./т. Анализ их эксплуатационных показателей показывает наличие значительного потенциала в экономии топлива и повышении качества готового продукта. Поэтому, вопросы всестороннего изучения данных агрегатов являются актуальными.

Комплексные расчетно-теоретические исследования известково-обжиговых печей представлены малым количеством работ [1,2]. До конца неизученным является вопрос о закономерностях смесеобразования в слое кускового материала [3]. В этой связи, целью данной работы, явилось исследование влияния турбулентной диффузии газа на технологический процесс обжига известняка.

Схема исследуемого агрегата приведена на рис. 1. Здесь:  $H_{нагр}$  – высота зоны нагрева известняка;  $H_{обж}$  – высота зоны обжига;  $H_{охл}$  – высота зоны охлаждения извести. Печь представляет собой вертикальную цилиндрическую шахту. Загрузка известняка осуществляется сверху скиповым питателем, выгрузка извести – в основании печи. Движение материала и газов противоточное. Печь состоит из трех технологических зон: зоны нагрева известняка, зоны обжига и зона охлаждения извести, в которой нагревается воздух. Подача топлива происходит через два яруса боковых горелок и центральную горелку (кern). Часть дымовых газов, отходящих из печи, направляется на рециркуляцию в центральную горелку.

При математическом моделировании печи была численно решена система дифференциальных уравнений, описывающих ее работу. В общую постановку тепло- и массопереноса были включены задача безвихревого движения газа в плотном слое кускового материала, задача конвективного и диффузионного переноса вещества в потоке, задача горения топлива, задача конвективного переноса теплоты в потоке, задача внутреннего тепло-массообмена в куске материала.

В качестве допущений для газа принято: движение установившееся, потенциальное, симметричное относительно оси печи; плотность теплоносителя не зависит

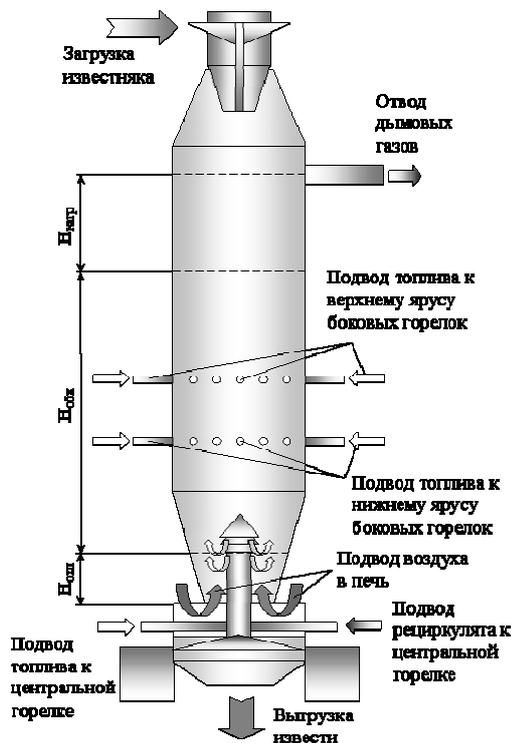


Рис. 1 - Схема шахтной известково-обжиговой печи на газообразном топливе

$H_{нагр}$  – высота зоны нагрева известняка;

Рисунок 1 – Схема шахтной известково-обжиговой печи на газообразном топливе

водность в газе и молекулярная диффузия не влияют на процесс; структура слоя постоянная по высоте и радиусу. Допущения для материала – кусок имеет сферическую форму; его размеры не изменяются в процессе термообработки; влияние скорости химической реакции и диффузии диоксида углерода  $\text{CO}_2$  в куске на интенсивность диссоциации пренебрежимо мало; теплопроводность границы раздела фаз «известь-известняк» (фронта диссоциации) определяется термическим сопротивлением прилегающих слоёв; температура выделившегося с поверхности куска  $\text{CO}_2$  равна температуре диссоциации; отсутствует также влияние продольной теплопроводности в слое.

В краткой форме математическая постановка задачи представлена в виде системы дифференциальных уравнений (1)–(5):

- уравнение потенциального движения газа в цилиндрической системе координат с учетом источников массы вещества:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi(r, h)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi(r, h)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi(r, h)}{\partial h^2} = \frac{\Delta V_{\text{ист}}^*(r, h)}{dV}, \quad (1)$$

где  $\varphi(r, h)$  – потенциал скорости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r$  – текущий радиус печи,  $\text{м}$ ;  $h$  – текущая высота печи,  $\text{м}$ ;  $\Delta V_{\text{ист}}^*(r, h)$  – изменение расхода газа в элементарном объеме в результате химических реакций горения топлива и диссоциации известняка,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $dV$  – элементарный объем,  $\text{м}^3$ .

- уравнение распределения концентраций газообразного вещества в движущемся несжимаемом потоке с учетом конвективного и диффузионного механизмов переноса:

$$\bar{w}_r(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial r} + \bar{w}_h(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial h} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_r(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial r} \right) + G_C(r, h), \quad (2)$$

где  $\bar{w}_r(r, h)$ ,  $\bar{w}_h(r, h)$  – радиальная и вертикальная составляющие вектора скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $C(r, h)$  – концентрация вещества, диффундирующего в слое,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $D_r(r, h)$  – коэффициент радиальной турбулентной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$  [4];  $G_C(r, h)$  – интенсивность выделения (поглощения) вещества в единице объема слоя, вследствие химических реакций горения топлива и диссоциации известняка,  $\text{с}^{-1}$ .

- уравнение конвективного переноса теплоты в потоке газа:

$$c_r(t_r) \cdot \left[ \bar{w}_h(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial h} + \bar{w}_r(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_r(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial r} \right) \right] = q_v(r, h), \quad (3)$$

где  $c_r(t_r)$  – изобарная объемная теплоемкость теплоносителя,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $t_r(r, h)$  – температура теплоносителя,  $^\circ\text{C}$ ;  $q_v(r, h)$  – закон распределения мощности источников (стоков) теплоты на основе решения задач горения топлива и диссоциации известняка,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

- уравнение внутреннего теплообмена материала:

$$\begin{aligned} & \rho_{M_i} \cdot c_{M_i}(t_M) \cdot \frac{\partial t_M(r_k, \tau, r)}{\partial \tau} = \\ & = \frac{\partial}{\partial r_k} \left( \lambda_{M_i}(t_M) \cdot \frac{\partial t_M(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} \right) + \lambda_{M_i}(t_M) \cdot \frac{2}{r_k} \cdot \frac{\partial t_M(r_k, \tau, r)}{\partial r_k}, \end{aligned} \quad (4)$$

где «i» – индекс соответствующий фазе известняка (i=1) или извести (i=1);  $\rho_M$ ,  $c_M(t_M)$ ,  $\lambda_M(t_M)$  – соответственно плотность, кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость, Дж/(кг·К), и теплопроводность, Вт/(м·К), материала, соответствующей фазе;  $r_k$  – текущий радиус куска, м;  $\tau$  – текущее время, с;  $t_M(r_k, \tau, r)$  – температура материала, °С.

• граничное условие для фронта диссоциации (на границах раздела фаз «известь»-«известняк»):

$$\begin{aligned} & -\lambda_{CaO}(t_M) \cdot \frac{\partial t_M(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} = -\lambda_{CaCO_3}(t_M) \cdot \frac{\partial t_M(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} + \\ & + q_{дис} \cdot \rho_{CaCO_3} \cdot \frac{\partial r_{\phi}}{\partial \tau} + \frac{\rho_{CaCO_3}}{\rho_{CO_2}} \cdot \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CaCO_3}} \cdot c_{CO_2}(t_{дис}) \cdot t_{дис} \cdot \frac{\partial r_{\phi}}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $q_{дис}$  – тепловой эффект эндотермической реакции диссоциации известняка, Дж/кг;  $\mu$  – мольная масса материала, кг/кмоль; «CaO», «CaCO<sub>3</sub>» – индексы соответствующие теплофизическим свойствам извести и известняка;  $t_{дис}$  – температура диссоциации известняка, °С;  $c_{CO_2}(t_{дис})$  – изобарная объемная теплоемкость диоксида углерода при температуре диссоциации, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $r_{\phi}$  – текущий радиус, определяющий положение фронта диссоциации в куске, м.

Расчет горения топлива представлен уравнениями реакций окисления горючих компонентов и окислительно-восстановительной реакции водяного газа. Система уравнений (1)–(5) дополнена рядом граничных условий: на поверхности материала, внутренних стенах печи, нижнем и верхнем торцах слоя, – обеспечивающих их совместное решение. Кроме того, учтены потери теплоты через боковую изоляцию.

Поставленная задача решена интегро-интерполяционным методом. Полученные в результате конечно-разностные уравнения реализованы на ПЭВМ в языке Visual Basic. Адекватность модели проверена путем ее сравнения с результатами известных численно-аналитических решений и экспериментальных данных работы печи.

Влияние турбулентной диффузии в газе изучалось в условиях шахтной печи №2 цеха обжига известняка ОАО «Алчевский металлургический комбинат» [5]. Печь отапливается природным газом, высота слоя материала 18 м, внутренний диаметр шахты 4,3 м. Нижний и верхний ярусы боковых горелок расположены соответственно на уровне 6 м и 8 м, центральная горелка – на уровне 2 м. Суточная производительность печи составляет 200 т/сут. Содержание (CaO+MgO)<sub>общ</sub> в извести – 75÷85 % при степени обжига известняка 84÷91 %. Размер обрабатываемых фракций известняка – 40÷100 мм.

В исследованном режиме работы печи: расход природного газа на центральную горелку составил 700 м<sup>3</sup>/ч, на нижний ярус боковых горелок – 200 м<sup>3</sup>/ч, на верхний ярус боковых горелок – 200 м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха – 12000 м<sup>3</sup>/ч; расход рециркулянта на цен-

тральную горелку – 1200 м<sup>3</sup>/ч.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и на рис. 2–4.

Таблица 1 – Показатели работы шахтной печи №2

Источник данных	Состав дымовых газов (сухая часть), %							Химический недожог, %	Степень обжига, %
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>		
Эксперимент	20,5	6,8	0,2	0,4	70,3	1,6	0,2	27,3	86,0*
Расчет с учетом диффузии	21,0	6,7	0,7	1,1	69,3	1,2	0,0	25,1	74,7
Расчет без учета диффузии	9,6	13,1	0,6	1,0	71,3	4,4	0,0	64,4	34,1

\* – по данным теплотехнической лаборатории завода.

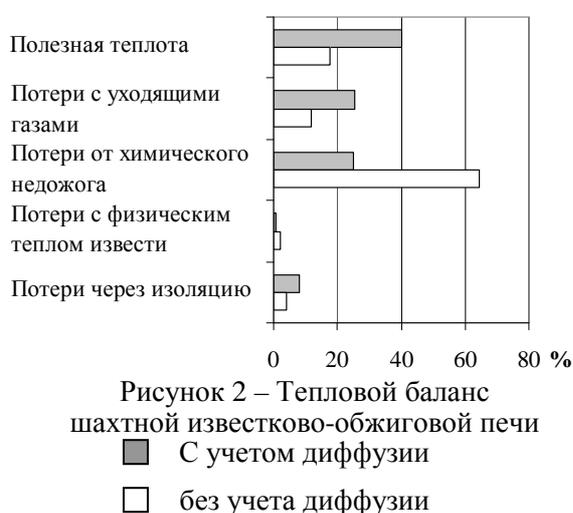


Рисунок 2 – Тепловой баланс шахтной известково-обжиговой печи  
 ■ С учетом диффузии  
 □ без учета диффузии

Согласно расчетным и экспериментальным данным, установленный режим является неэффективным с точки зрения использования топлива, поскольку величина химического недожога достигает 27 %.

Наиболее близкие результаты к реальным показаниям работы печи имеет решение с учетом турбулентной диффузии газа, о чем свидетельствуют состав дымовых газов и конечная степень обжига (табл. 1).

Без учета переноса вещества на микроуровне процесс смесеобразования определяется только лишь конвекцией.

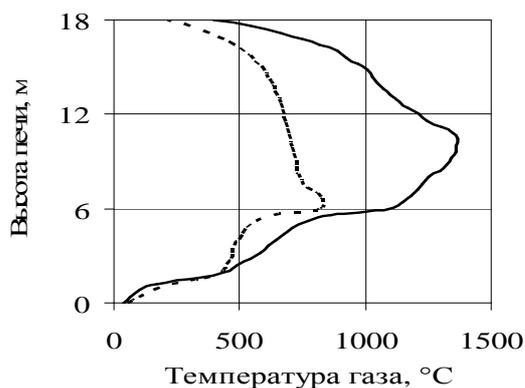


Рисунок 3 – Изменение средней температуры газа по высоте печи  
 — с учетом диффузии  
 - - - без учета диффузии

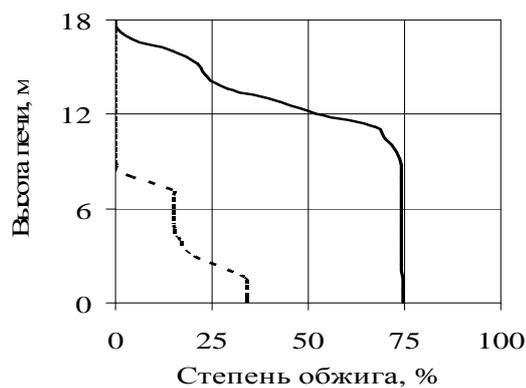


Рисунок 4 – Изменение степени обжига известняка по высоте печи  
 — с учетом диффузии  
 - - - без учета диффузии

В результате, расчетное значение химического недожога составляет 64,4 %, средняя температура газов по высоте печи не превышает 900 °С, а конечная степень обжига известняка равна 34,1 %.

С учетом диффузии происходит перераспределение между расходными статьями теплового баланса печи. Снижается химический недожог, увеличивается полезная теплота и потери теплоты с уходящими дымовыми газами. При этом, расчетные потери теплоты через изоляцию печи увеличиваются с 4 % до 8 %.

Анализ рис. 3–4 показывает значительную неравномерность хода печи. При средней температуре газа в сечении печи 500 °С наблюдается обжиг известняка, что свидетельствует у наличии очагов горения в верхних слоях материала.

Таким образом, турбулентная диффузия оказывает существенное влияние на характер тепло- и массообменных процессов в известково-обжиговой печи. Можно заключить, что учет данного фактора при моделировании является обязательным и существенно повышает точность модели.

### **Выводы**

Решена задача тепло- и массопереноса в шахтной известково-обжиговой печи на газообразном топливе с учетом особенностей движения газа в плотном слое кускового материала, конвективного и диффузионного переноса вещества в потоке, кинетики выгорания топлива, внешнего переноса теплоты конвекцией в потоке, теплофизических процессов внутри куска материала.

На основе расчетно-теоретических исследований установлено, что турбулентная диффузия газа оказывает существенное влияние на характер тепло- и массообменных процессов в известково-обжиговых печах. Учет данного фактора при моделировании повышает точность модели.

### **Литература**

1. Ляшенко Ю.П. Разработка и внедрение эффективных газодинамических и тепловых режимов шахтных печей для обжига известняка: Автореф. дис... канд.техн.наук: 05.14.04. – Днепропетровск, 1985, – 22 с.
2. Швыдкий Д.В. Разработка новой технологии получения металлургической извести в шахтных печах: Автореф. дис... канд.техн.наук: 05.16.02.: – Екатеринбург, 1997. – 19 с.
3. Розенгарт Ю.И., Федоров О.Г., Ляшенко Ю.П. и др. Движение газов в шахтных известково-обжиговых печах // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – №6. – С. 79–81.
4. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем.– Л.: Химия, 1968.– 512 с.
5. Федоров О.Г., Бойко В.Н., Сазонов С.И., Форись С.Н. Методика определения тепло-технологических показателей работы шахтных известково-обжиговых печей по результатам химического анализа уходящих газов // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. – Т. 9. – Днепропетровск: НМетАУ, – 2003. – С. 10–15.

### **Bibliography (transliterated)**

1. Lyashenko Yu.P. Razrabotka i vnedrenie effektivnykh gazodinamicheskikh i teplovykh rezhimov shahtnykh pechey dlya obzhiga izvestnyaka: Avtoref. dis... kand.tehn.nauk: 05.14.04. – Dnepropetrovsk, 1985, – 22 p.
2. Shvyidkiy D.V. Razrabotka novoy tehnologii polucheniya metallurgicheskoy izvesti v shahtnykh pechah: Avtoref. dis... kand.tehn.nauk: 05.16.02.: – Ekaterinburg, 1997. – 19 p.
3. Rozengart Yu.I., Fedorov O.G., Lyashenko Yu.P. i dr. Dvizhenie gazov v shahtnykh izvestkovo-obzhigovykh pechah Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. – 1990. – #6. – p. 79–81.

4. Aerov M.E., Todes O.M. Gidravlicheskie i teplovyie osnovyi raboty apparatov so statsionarnym i kipyaschim zernistyim sloem.– L.: Himiya, 1968.– 512 p.

5. Fedorov O.G., Boyko V.N., Sazonov S.I., Foris S.N. Metodika opredeleniya teplo-tehnologicheskikh pokazateley raboty shahtnyih izvestkovo-obzhigovyih pechey po rezultatam himicheskogo analiza uhodyaschih gazov Metallurgicheskaya teplotehnika: Sb. nauch. tr. - T. 9. – Dnepropetrovsk: NMetAU, – 2003. – p. 10–15.

УДК 51-74:669.162-669.181.4

Форись С.М., Федоров С.С., Федоров О.Г.

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТУРБУЛЕНТНОЇ ДИФУЗІЇ ГАЗУ НА РОБОТУ ШАХТНИХ ВАПНЯНО-ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

Розроблено математичну модель шахтної вапняно-випалювальної печі на газоподібному паливі. У моделі враховані особливості зовнішнього й внутрішнього теплообміну, газодинаміки, конвективного та дифузійного переносу речовини, горіння палива. Встановлено, що врахування турбулентної дифузії газу при моделюванні істотно впливає на точність моделі.

УДК 669.2

Потапов Б.Б., Пинчук В.А., Шелудько И.Б.

### ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ КОМБИНИРОВАНИЕ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ШЛАМОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

При переработке скопившихся возле многих металлургических заводов больших запасов (по несколько миллионов тон) замасленной окалины в смеси со шламами процессы жидкофазного восстановления (ПЖВ) обеспечивают себестоимость чугуна значительно более низкую, чем при выплавке чугуна в доменной печи [1,2]. Потенциальные преимущества таких процессов – весьма значительны. Процессы жидкофазного восстановления не требуют коксующихся углей и окускованного железорудного сырья, могут перерабатывать любые технологические отходы, в том числе с высоким содержанием цинка, свинца, щелочей и других вредных примесей. Они значительно проще в управлении, чем доменные печи. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ сокращаются в 5–10 раз, по сравнению с коксо-агло-доменной технологией.

Продвижение и реализация процессов жидкофазного восстановления сдерживается следующими причинами. В связи с высоким уровнем температур в объеме реактора возникают серьезные затруднения с сжиганием газа над ванной из-за диссоциации трехатомных компонентов. Температура газов из реактора, в зависимости от степени их дожигания над ванной, составляет 1500–1800 °С, а в их составе содержание горючих компонентов соответствует теплоте сгорания 2,2–7,5 МДж/м<sup>3</sup>. Химически связанное тепло газов составляет 70–40 % общего содержания в них тепловой энергии [3].

Все это создает предпосылки создания энерготехнологического комплекса, обеспечивающего за счет утилизации химической и физической энергии высокотемпературных продуктов из реактора высокие энергетические и экономические показатели процесса.

Разработана система энергетической утилизации химического и теплового потенциала газов из реактора ПЖВ. Достоинством предложенного решения является комплексный подход и высокая эффективность преобразования энергии. Схематическое изображение комплекса представлено на рис. 1.

Условно схему блока энергетического использования потенциала газов из реактора можно разбить на следующие функциональные модули: утилизация физического тепла газа и шлака; очистка газа от зольного уноса; газотурбинный цикл; паротурбинный цикл. Каждый функциональный модуль характеризуется определенным набором технологических параметров.

Газотурбинная установка состоит из компрессора, камеры сгорания и турбины. Газовая турбина работает на смеси продуктов сгорания газа и воздуха. Компрессорная группа обеспечивает общую степень сжатия 6:1 и сжимает количество воздуха, необходимое как для сжигания генераторного газа в камере сгорания, так и для расхолаживания продуктов сгорания перед газовой турбиной. Камера сгорания конструируется компактной в расчете на большую теплонапряженность. Генератор электроэнергии связан тем же валом, что и турбина с компрессорами. Турбина передает мощность на вал, где приблизительно половина мощности используется для привода компрессоров, а остальная часть – электрогенератора. Для повышения эффективности схемы энергия, полученная от уходящих газов турбины, используется для получения перегретого пара в котле-утилизаторе.



Газ, покидає реактор з температурою 1700 °С. Процес охолодження газу здійснюється в охладителі газу, що дозволяє повернути в цикл певну частину фізического тепла газів. В процесі охолодження газу в охладителі здійснюється значительний відвід теплоти (до 85 %), який передається питательній воді паротурбинного циклу для отримання перегретого пару. Парова турбіна, що застосовується в цьому циклі, зазвичай є конденсаційною без регенеративного підігріву питательної води. В схемі нецелесообразно використовувати парову турбіну з проміжним перегрівом пару. В парогазовому циклі, підігрів повітря до компресора нецелесообразен, а після компресора неможливо, і повітрянагрівач в охладителі генераторного газу відсутній. Таким чином, відводиме тепло від газу йде на генерацію пару. На частину парового потоку приходиться до 50 % потужності вироблюваної парогазової установки. Різав шлаку, що отримується в технологічному процесі, охолоджується на водоохолоджуємих валках, використовуючи свою теплоту, затверджує, а потім дробиться на дробильних валках і використовується як будівельний матеріал, а не викидається в шлакові відвали тим самим, забруднюючи навколишнє середовище.

В реакторі ПЖВ (1) здійснюється технологічний процес з утворенням чугуна, газу і розплаву шлаку (рис. 1). Високотемпературний газ поступає в охладитель газу (2). Після нього газ подається на очищення. Спочатку очищується від крупнодисперсних частинок шлаку в циклоні (3) а потім доочищується в металлотканевому фільтрі (4). Очищений газ стискається в турбокомпресорі (5) і разом зі стиснутим повітрям з компресора повітря (6) підводиться в камеру згорання (7). Продукти згорання поступають в газову турбіну (8) для вироблення електроенергії. Оброблені продукти згорання з газової турбіни охолоджуються в котле-утилізаторі (10). Далі димові гази проходять через дымосос (11) і викидаються в атмосферу.

Образуючийся рідкий шлак стікає в копільник розплаву, звідти поступає на водоохолоджуємих валки (12), затверджує, а потім дробиться на дробильних валках. Перегретий пар, що утворюється в охладителі, подається в парову турбіну (13) для вироблення електроенергії. З турбіни оброблений пар конденсується в конденсаторі (15) і подається насосом (16) в деаератор (17) разом з підігрівачою водою з блоку хімічної очистки води (18), компенсуючи втрати води і пару в системі. Другий потік високотемпературного газу з реактора направляється для сушки (19) і підігріву сировини (20) для технологічного процесу. Загальний тепловий баланс комплексу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Загальний тепловий баланс комплексу продуктивністю 40 т/ч

Статті балансу приходу	ГДж/ч	%	Статті балансу расхода	ГДж/ч	%
Хімічна теплота газу	161,4	9,5	Теплота на парову турбіну	98,64	24,1
Фізическа теплота газу	202,3	49,5	Теплота на газову турбіну	66,6	16,3
Фізическа теплота шлаку	42,1	10,3	Теплота на привод компресорів	49,3	12,1
Фізическа теплота повітря	3,2	0,7	Втрати теплоти зі шлаком	26,1	6,4
			Втрати теплоти з відходящими газами	39,6	9,7
			Втрати в охладителі газу	12,77	3,1
			Втрати в газотурбинному блоці	4,7	1,1
			Втрати в паротурбинному блоці	111,29	27,2
Ітого	409	100	ітого	409	100

Проведенная оценка эффективности предложенной схемы показала, что КПД брутто представленной системы составляет до 55 %, а КПД нетто 40 %. При производительности реактора ПЖВ 40т/ч и пропускании через блок энергетического использования энергии 70000 м<sup>3</sup>/ч газообразных продуктов процесса мощность парогазового цикла составит 46 МВт. При полной утилизации физического и химического потенциала газов из реактора в комплексе энергетического использования (утилизируется энергия 130000 м<sup>3</sup>/ч газов) выработка электрической энергии составит 84,3 МВт.

#### Литература

1. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСИС. Издательский дом «Руда и металл», 2005.– 400 с.
2. Вильдинов С.К., Валавин В.С., Роменец В.А. Перспективы применения технологии Ромелт для переработки красных шламов // Сталь.– 1998.– № 7.– С. 73–78.
3. Похвистнев Ю.В, Томилин И.А. Термодинамический анализ дожига CO и H<sub>2</sub>O в металлургических агрегатах // Известия Вузов Черная металлургия.– 1989.– №11.– С. 80–10.

#### Bibliography (transliterated)

1. Protsess Romelt Pod red. V.A. Romentsa. – M.: MISIS. Izdatelskiy dom «Ruda i metall», 2005.– 400 p.
2. Vildinov S.K., Valavin V.S., Romanets V.A. Perspektivyi primeneniya tehnologii Romelt dlya pererabotki krasnyih shlamov Stal.– 1998.– # 7.– p. 73–78.
3. Pohvistnev Yu.V, Tomilin I.A. Termodinamicheskiy analiz dozhiganiya SO i N<sub>2</sub>O v metallurgicheskikh agregatah Izvestiya Vuzov Chernaya metallurgiya.– 1989.– #11.– p. 80–10.

УДК 669.2

Потапов Б.Б., Пінчук В.О., Шелудько І.Б.

### **ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНЕ КОМБІНУВАННЯ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ШЛАМІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА І ЙОГО ЕФЕКТИВНІСТЬ**

Представлено енерготехнологічний комплекс по переробці шламів металургійного виробництва. Основу установки складає реактор, у якому реалізується процес жидкофазного відновлення сировини з одержанням залозистого розплаву. Утилізація хімічного і теплового потенціалу газів з реактора здійснюється в паротурбінному і газотурбінному циклах. Представлено оцінку енергетичної ефективності розробки.

УДК 629.5.01

Романов В.В., Раимов Р.И., Черный Г.В.

**НОВЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 45 И 60 МВт  
РАЗРАБОТКИ ГП НПКГ "ЗОРЯ"- "МАШПРОЕКТ"  
И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ  
НА ИХ ОСНОВЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ УКРАИНЫ**

*ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект", Украина, Николаев*

Сегодня максимальная экономия энергетических ресурсов и их эффективное использование являются одними из самых важных составляющих строительства системы энергетической безопасности Украины. Прогнозируемый в ближайшие годы рост цен на топливные ресурсы и, прежде всего, природный газ – делает проблему эффективности энергетической установки требованием времени. Другой важнейшей проблемой является маневренность энергосистемы, возможность погашения пиков суточных и сезонных нагрузок. Нехватка высокоманевренных и пиковых мощностей стала одной из главных проблем энергетики нашей страны. Еще одной важнейшей задачей для Украины является решение проблемы экологической безопасности ее граждан. Необходимый прирост населения, снижение общего уровня заболеваемости, обеспечение увеличения трудоспособного возраста для граждан необходимы для динамичного развития страны в 21 веке.

Внедрение новых высокоманевренных энергетических установок с высоким коэффициентом полезного действия позволит решить проблему максимальной экономии энергетических ресурсов, регулирования мощности энергосистемы Украины и создания системы экологической безопасности. Сохранение себестоимости произведенной электроэнергии при увеличении ее выработки позволит обеспечить стабильность ценовых показателей для промышленности и населения страны. Сегодня во всем мире наиболее привлекательным направлением создания новых энергетических установок является использование газотурбинных технологий.

Газотурбинные двигатели (газовые турбины) и созданные на их основе когенерационные и парогазовые установки на сегодняшний день являются одним из наиболее перспективных направлений создания высокоэффективных, высокоманевренных и экологически чистых установок для энергетики.

В период 2003–2005 годы Государственным предприятием Научно-производственным комплексом газотурбостроения "Зоря"- "Машпроект" (г. Николаев, Украина) разработаны две новые газотурбинные установки для энергетики мощностью 45 МВт (ГТЭ-45) и 60 МВт (ГТЭ-60). Установки предназначены для использования в составе как вновь проектируемых, так и реконструируемых тепло и электростанций различной мощности.

Основные технические показатели газотурбинных установок приведены в таблице 1.

Установки соответствует лучшим аналогам таких ведущих мировых фирм как General Electric, MAN, Alstom - как по техническим, так и по экономическим показателям. Сравнительный анализ украинских и зарубежных аналогов приведен в ежегодном каталоге «Gas Turbine World» (таблица 2).

Таблиця 1

	ГТЭ-45	ГТЭ-60
Мощность электрическая (на клеммах генератора), МВт	45	60
Температура газа за камерой сгорания, °С	1275	1295
Степень повышения давления в компрессоре	14,1	18,1
КПД, отнесенный к мощности на клеммах генератора, %	34,7	37,0
КПД в условиях ISO 2314, отнесенный к мощности на выходном валу ГТД, %	36,3	38,8
Расход воздуха на входе в компрессор, кг/с	134,3	170,4
Частота вращения ротора турбины, об/мин	3960	4320
Частота вращения выходного вала редуктора, об/мин	3000	3000
Температура газов на выходе из ГТД, °С	545	517

Таблиця 2

Модель ГТД	Фирма изготовитель	Мощность (ISO), кВт	КПД (ISO), %	Цена, тыс.долл. США	Цена за 1 кВт мощности, долл.США
ГТЭ-45	ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект"	47700	36,1	8400	176
ГТЭ-60		63500	38,8	9150	144
GTX100	Alstom	43000	37,0	11830	275
FT8 Twin	Man Turbomaschinen	51350	38,4	14800	287
LM6000PD	GE Aero Energy Products	42330	41,1	10200	241
GT8C2	Alstom	57000	33,8	16100	281

Сравнивая технические и ценовые показатели газотурбинных установок различных фирм, следует обратить внимание на то, что при сохранении уровня технических показателей украинских газотурбинных установок ГТЭ-45 и ГТЭ-60, цена за единицу производимой мощности в 1,5...1,7 раза ниже, чем у их зарубежных аналогов.

Необходимо отметить еще ряд важнейших факторов, которые могут быть положительно оценены потенциальным Заказчиком.

Одним из важнейших показателей, является маневренность газотурбинной установки, позволяющая использовать ее в режиме погашения пиковых нагрузок. Время пуска и выхода на режим номинальной мощности ГТЭ-45 и ГТЭ-60 не превышает 30 минут. Время остановки с режима номинальной мощности до полного снятия нагрузки не превышает 30 минут. Работа в пиковом классе использования на сегодняшний день, да и в будущем, будет востребована на территории Украины.

Другим важнейшим показателем, без которого не может существовать современная техника, являются показатели экологической безопасности. Установки ГТЭ-45 и ГТЭ-60 по своим экологическим показателям соответствуют лучшим мировым анало-

гам. Уровень эмиссии окислов азота ( $\text{NO}_x$ ) не превышает  $50 \text{ мг/нм}^3$ . Этот показатель экспериментально подтвержден на испытательном стенде в научно-исследовательской лаборатории предприятия. Комплексная система шумоглушения обеспечивает уровень шума не более 80 ДБа. Такие показатели позволяют размещать газотурбинные установки непосредственно в городской черте, что особенно важно при реконструкции ранее действующих ТЭЦ и ТЭС.

Предлагаемые газотурбинные установки ГТЭ-45 и ГТЭ-60 специально спроектированы для работы в составе когенерационных или парогазовых установок - температура выхлопных газов для подачи в котел-утилизатор составляет соответственно 547 и 517 °С.

Основой установки является новый газотурбинный двигатель (ГТД), разработки ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект". При проектировании ГТД, использовался опыт ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" по созданию газотурбинной установки ГТЭ-110 мощностью 110 МВт и учитывался опыт создания и эксплуатации других установок. Первый блок ПГУ мощностью 325 МВт с двумя серийно изготовленными ГТД-110 смонтирован на ИвГРЭС (г. Комсомольск, Ивановская область, Россия).

Конструктивно газотурбинный двигатель, используемый в газотурбинных установках ГТЭ-45 и ГТЭ-60, выполнен на единой раме, и имеет следующие габариты: 5,6 м – в длину, 3,3 м – в ширину, 3,5 м – в высоту (рис. 1).



Рисунок 1 – Общий Вид ГТД-60, разработки "Зоря"- "Машпроект"

Масса газотурбинного двигателя в сборе – не превышает 30 тонн. Моноблочная конструкция, небольшие габариты и масса двигателя позволяют его испытывать в собранном виде и предъявлять Заказчику на заводском испытательном стенде, что невозможно для промышленных энергетических турбин. Значительно упрощается процесс замены двигателя в эксплуатации. Обеспечивается возможность транспортирования его любым видом транспорта.

Газотурбинный двигатель состоит из следующих узлов (рис. 2):

– пятнадцатиступенчатого компрессора, служащего для сжатия и подачи сжатого воздуха на горение;

- камери сгорання, с двадцатью жаровыми трубами, в которую подается топливо и организуется процесс горения;
- четырехступенчатой турбины, в которой вырабатывается полезная мощность.

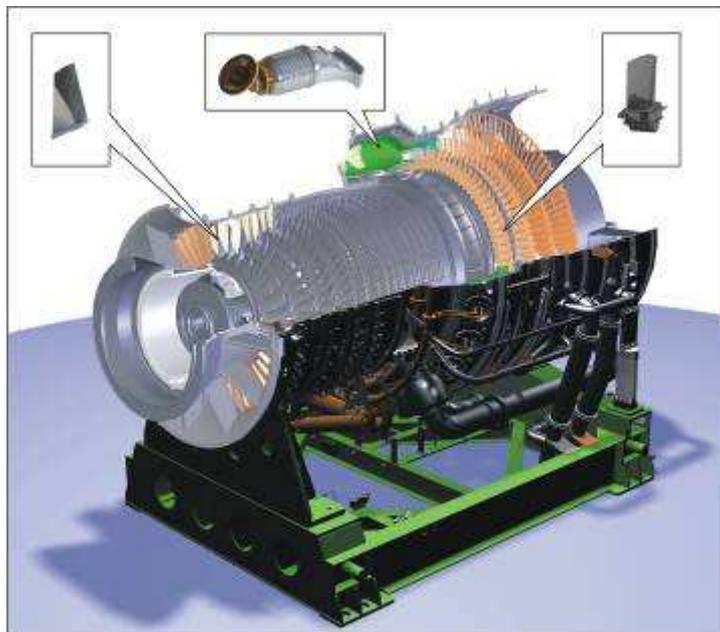


Рисунок 2 – Основные узлы ГТД-60

Ротор двигателя – диско-барабанного типа, с установленными на нем рабочими лопатками компрессора и турбины. Рабочие лопатки выполнены из титановых и жаропрочных никелевых сплавов.

Газотурбинная энергетическая установка (рис. 3) состоит из газотурбинного двигателя, электрогенератора, редуктора, оборудования и систем, необходимых для ее функционирования – системы смазки, топливной системы, системы охлаждения и других систем.

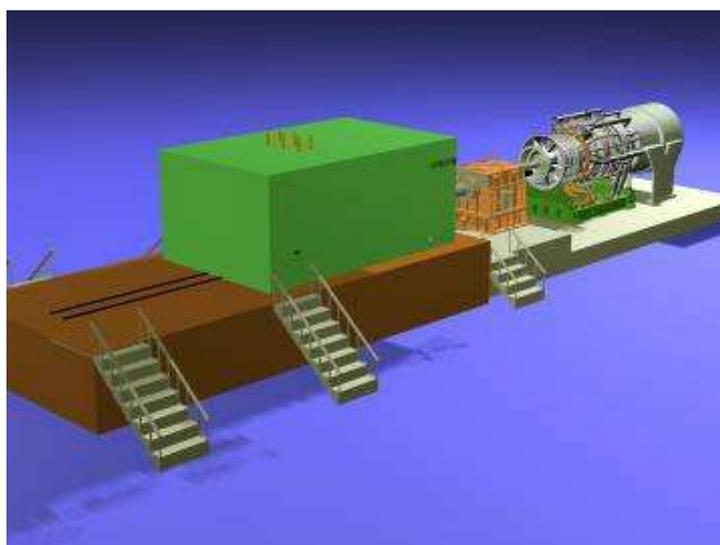


Рисунок 3 – Газотурбинная энергетическая установка на основе ГТД-60

Газотурбинний двигатель и редуктор размещены в теплозвукоизолирующих контейнерах.

Рядом с ГТД расположен маслобак, обеспечивающий подачу масла к двигателю, редуктору и генератору, блок топливных агрегатов газообразного топлива, обеспечивающий подачу и регулирование расхода топлива на всех режимах.

Воздух к входной улитке ГТД подается по воздуховоду от комплексного воздухоочистительного устройства, расположенного у машинного зала.

Такая блочная компоновка позволяет значительно снизить затраты на капитальное строительство и уменьшить его продолжительность. Оборудование можно размещать как и в уже существующих капитальных сооружениях, так и в сооружениях из легкокорборных металлических панелей, что значительно снижает стоимость необходимого капитального строительства, и естественно, весьма привлекательно для любого инвестора.

Возможность гибкой компоновки оборудования позволяет максимально эффективно использовать существующие инженерные сети и сооружения, а также уменьшать площадь занимаемой территории и создавать оптимальную схему непосредственно для каждого объекта.

На базе ГТЭ-60 ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" разработан ряд парогазовых установок различной мощности. Парогазовые установки ПГУ-85 мощностью 85 МВт и ПГУ-170 – мощностью 168 МВт имеют коэффициент полезного действия не ниже 52 %. Параметры ПГУ приведены в таблице 3.

Таблица 3

Наименование параметра	ПГУ-85	ПГУ-170	ПГУ-220	
			Конденсационный режим	Теплофикационный режим
Электрическая мощность ПГУ, МВт	83,8	167,6	227,3	196,8
КПД ПГУ в условиях станции, %	52,1	52,1	44,5	67,6
Количество ГТЭ-60	1	2	1	
Количество паровых турбин	1x К-25	1x К-25	1 x К-150-130	
Мощность паровой турбины, МВт	25,0	50	168,5	138,0
Удельный расход условного топлива на выработку эл.энергии, гут/кВт.ч	235,8	235,8	275,6	226,0
Удельный расход условного топлива на выработку тепла, гут/Гкалл	-	-	-	142,8

Следует отметить, что для Украины наиболее оптимальным является вариант с использованием газотурбинной установки ГТЭ-60 в качестве газотурбинной надстройки к существующим паросиловым блокам ТЭЦ или ТЭС. Привлекательность такого способа повышения мощности и экономичности паросилового блока состоит в том, что используется существующее оборудование с минимальной его модернизацией. При этом мощность тепловой электростанции повышается на 25–30 %, а ее экономичность на 18–20 %. Предлагаемая схема модернизации существующих паросиловых блоков позволяет минимизировать затраты и сократить время реконструкции теплоэлектростанции. Немаловажным фактором является и то, что для размещения оборудования не

нужны значительные дополнительные площади, что позволяет реконструировать теплоэлектростанции в черте города, где практически невозможен отвод дополнительной земли.

ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" уже имеет успешный опыт модернизации паросиловых блоков Березовской ГРЭС (г. Белоозерск, Брестская область, Беларусь). В период июль 2003–декабрь 2004 г. на электростанции были установлены и введены в эксплуатацию в качестве газотурбинной надстройки существующих котлов ПК-38Р – 4 газотурбинных установки ГТЭ-25 (мощность 25 МВт каждая) ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект". Мощность ГРЭС увеличилась с 330 до 420 МВт, а суммарный расход топливного газа вырос только на 5 %. Удельный расход условного топлива снизился с 370 грамм условного топлива на кВт\*час до 307 гут/кВт\*час.

В качестве примера такой модернизации с использованием газотурбинной установки ГТЭ-60 в таблице 3 приведены показатели парогазовой установки ПГУ-220 мощностью 220 МВт.

В парогазовой установке ПГУ-220 газотурбинная установка ГТЭ-60 используется для повышения экономичности блока в качестве газотурбинной надстройки к существующему котлу типа ТП-90, паропроизводительностью 500 т/ч, который входит в состав паросилового блока мощностью 150–160 МВт. В качестве пилотного проекта - принято действующее основное оборудование (котлоагрегат и паровая турбина) паросилового блока мощностью 150 МВт Приднепровской тепловой электростанции (ПД ТЭС), на которой находятся в эксплуатации четыре блока мощностью 150 МВт, установленные в 1958–1961 годах. В 1981–1987 годах блоки модернизированы – конденсационные турбины типа К-150-130 переведены в теплофикационный режим.

Проведенные расчеты, показывают, что удельный расход условного топлива энергетических установок на базе ГТЭ-60 для выработки электроэнергии составляет 275,6 грамм условного топлива на кВт\*час, что на 37,5 % ниже существующего на сегодня уровня – 379 гут/кВт\*час. Это свидетельствует о целесообразности предлагаемой реконструкции станции в условиях возрастания цен на топливные ресурсы.

В заключение, хотелось бы еще раз отметить исключительные достоинства газотурбинных и парогазовых энергетических установок:

- высокая экономичность. КПД нового блока не ниже 50 %, КПД реконструируемого блока ПГУ около 40 %;
- высокая маневренность и тепловая эффективность. Время пуска с выходом на номинальную мощность составляет не более 30 минут, а в экстренных случаях – до 10 мин;
- продолжительность строительства от начала до ввода в эксплуатацию не превышает двух лет, а срок окупаемости составляет 4–6 лет, что весьма привлекательно для любых субъектов инвестирования;
- возможность размещения в черте города за счет высоких экологических показателей и отсутствия необходимости отвода земли.

Создание системы энергетической безопасности Украины на базе газотурбинных технологий является важнейшим фактором стабильности жизни граждан и процветания государства.

### Литература

1. Романов В.В., Чернов С.К., Раимов Р.И. К вопросу о применении газотурбинных технологий как одной из составляющих создания системы энергетической безо-

пасности Украины. // Ежеквартальный научно-технический журнал "Интегрированные технологии и энергосбережение" №2.– 2006.– С. 131–139.

2. Романов В., Чернов С., Раимов Р. Газотурбинные технологии как одна из составляющих эффективного использования энергоресурсов Украины и создания системы энергетической безопасности государства. // Энергетическая политика Украины. – 2006. – №3–4 – С. 84–91.

3. Борисов Н. Реконструкция ТЭС в Украине: планы и потребности // Энергетическая политика Украины. – 2003. – №12. – С. 82–84.

4. Баталов А., Салимон В. Баланс интересов. О проблеме дефицита высокоманевренных регулирующих мощностей в ОЭС Украины // Энергетическая политика Украины. – 2004. – №6. – С. 54–57.

5. Литвинский Л. Стратегия развития ядерной энергетики в Украине на период до 2030 года и дальнейшую перспективу // Энергетическая политика Украины. – 2003. – №9. –С. 10–15.

6. Дуброва И. Стройки века//Энергетическая политика Украины. – 2004. – №10.– С. 68–70.

7. Романов В., Склярский Д. Премьера николаевских энергоустановок // Энергетическая политика Украины. – 2004. – №2. – С. 80–82.

8. Романов В., Раимов Р., Захаров С. Газотурбинные установки для повышения эффективности и маневренности энергетики Украины // Энергетическая политика Украины. – 2005. – №4.–С. 76–81.

9. Романов В., Чернов С, Раимов Р. Газотурбинные и парогазовые установки для энергетики как основа обороноспособности каждого государства // Военный парад. – 2006. – №2 (73).–С. 82–85.

#### Bibliography (transliterated)

1. Romanov V.V., Chernov S.K., Raimov R.I. K voprosu o primeneniі gazoturbiniyih tehnologiy kak odnoy iz sostavlyayuschih sozdaniya sistemyi energeticheskoy bezopasnosti Ukrainyi. Ezhekvartalnyi nauchno-tehnicheskij zhurnal "Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie" #2.– 2006.– p. 131–139.

2. Romanov V., Chernov S., Raimov R. Gazoturbiniyie tehnologii kak odna iz sostavlyayuschih effektivnogo ispolzovaniya energoresursov Ukrainyi i sozdaniya sistemyi energeticheskoy bezopasnosti gosudarstva. Energeticheskaya politika Ukrainyi. – 2006. – #3–4 – p. 84–91.

3. Borisov N. Rekonstruktsiya TES v Ukraine: planyi i potrebnosti Energeticheskaya politika Ukrainyi. – 2003. – #12. – p. 82–84.

4. Batalov A., Salimon V. Balans interesov. O probleme defitsita vyisokomanevrennyih reguliruyuschih moschnostey v OES Ukrainyi Energeticheskaya politika Ukrainyi. – 2004. – #6. – p. 54–57.

5. Litvinskiy L. Strategiya razvitiya yadernoy energetiki v Ukraine na period do 2030 goda i dalneyshuyu perspektivu Energeticheskaya politika Ukrainyi. – 2003. – #9. –p. 10–15.

6. Dubrova I. Stroyki veka Energeticheskaya politika Ukrainyi. – 2004. – #10.–p. 68–70.

7. Romanov V., Sklyarskiy D. Premera nikolaevskih energoustanovok Energeticheskaya politika Ukrainyi. – 2004. – #2. – p. 80–82.

8. Romanov V., Raimov R., Zaharov S. Gazoturbinnnye ustanovki dlya povyisheniya effektivnosti i manevrennosti energetiki Ukrainyi Energeticheskaya politika Ukrainyi. – 2005. – #4.–p. 76–81.

9. Romanov V., Chernov S, Raimov R. Gazoturbinnnye i parogazovyie ustanovki dlya energetiki kak osnova oboronosposobnosti kazhdogo gosudarstva Voennyiy parad. – 2006. – #2 (73).–p. 82–85.

УДК 629.5.01

Романов В.В., Раїмов Р.І., Чорний Г.В.

**НОВІ ГАЗОТУРБІННІ УСТАНОВКИ ПОТУЖНІСТЮ 45 И 60 МВт РОЗРОБКИ  
ГП НПКГ "ЗОРЯ"- "МАШПРОЕКТ" І ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ  
УСТАНОВКИ НА ЇХНІЙ ОСНОВІ В ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ**

Проведено розрахунки, щодо витрат умовного палива енергетичних установок для вироблення електроенергії. Доведено, що ці витрати на 37,5 % нижче існуючого на теперішній час рівня. Це свідчить про доцільність пропонованої реконструкції станції в умовах зростання цін на паливні ресурси.

Оліярник Б.О., Бондарук А.Б., Глебов В.В., Євтушенко К.С.

## ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ОРІЄНТАЦІЇ І НАВІГАЦІЇ РУХОМИХ БОЙОВИХ МАШИН

Зростаючі вимоги до готовності ведення вогню рухомими артилерійськими і ракетними комплексами на гусеничному і колісному ході привели до того, що автоматичні системи орієнтації і навігації набули широкого використання. Найпоширенішими системами навігації рухомих об'єктів сьогодні є системи, які побудовані на сумісному використанні супутникових навігаційних систем (СНС) в поєднанні з автономними одометричними навігаційними системами (АНС). Сьогодні такі системи називають комплексованими або інтегрованими системами [1–3]. Використання СНС у комплексі з АНС дозволяє виключити недоліки окремих систем і підвищити надійність та ефективність навігаційної інформації.

Положення бойової машини на земній поверхні визначається її координатами. Основна задача, яка вирішується навігаційною системою, полягає у визначенні, як правило, прямокутних координат  $X$ ,  $Y$  та кутового положення  $\alpha$  поздовжньої осі машини (дирекційного кута). Система прямокутних координат – система, в якій місце об'єкта на земній поверхні задається взаємноперпендикулярними осями  $X$ ,  $Y$ . Причому за вісь  $Y$  приймається лінія екватора, а за вісь  $X$  – лінія паралельна меридіану однієї з 60 зон, на які розбивається поверхня Землі. Дирекційний кут відлічується від осі  $X$ , тобто від вертикальної лінії координатної сітки топографічної карти по ходу стрілки годинника.

Пропонується структура та основні завдання комплексованої системи навігації та топоприв'язки (КСНТП) для бойової машини БМ-21У, яка також може використовуватись і для інших аналогічних рухомих об'єктів. Структура КСНТП наведена на рис. 1.

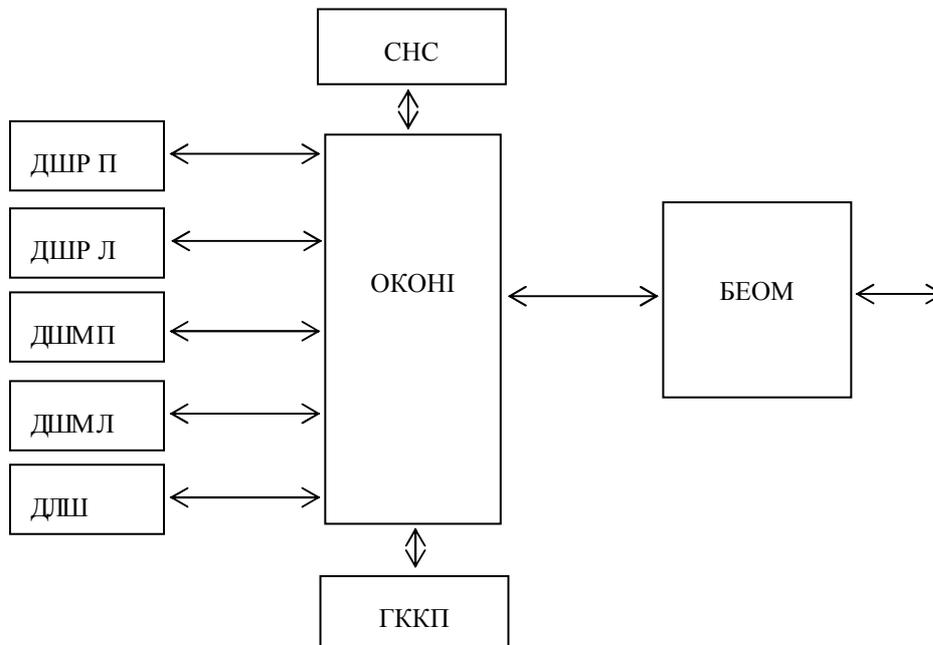


Рисунок 1 – Структура КСНТП

До складу КСНТП входить:

- бортова ЕОМ (БЕОМ);
- обчислювач комплексованої обробки навігаційної інформації (ОКОНІ);
- супутникова навігаційна система (СНС);
- гірокурсорепоказчик (ГККП);
- давачі швидкості радіолокаційні правий і лівий (ДШР П, ДШР Л);
- давачі швидкості механічні правий і лівий (ДШМ П, ДШМ Л);
- трьохкомпонентний давач лінійних швидкостей (ДЛШ).

В комплект апаратури також входять засоби ручного визначення дирекційного кута, а саме артилерійська бусоль з гіроприставкою. Робота системи основана на безперервному вимірюванні (після початкової орієнтації) швидкості і напрямку руху бойової машини з відображенням її на цифровій карті місцевості на БЕОМ.

Для вимірювання швидкості руху використовуються давачі швидкості радіолокаційні по лівому і правому бортах бойової машини і давачі швидкості електромеханічні також по лівому і правому бортах. Як один, так і другий тип давачів швидкості мають свої переваги та недоліки. Так радіолокаційні давачі дають значні похибки при русі об'єкта по трасі з нерівностями і по пересіченій місцевості, але досить точно вимірюють швидкості об'єкта в умовах юзу та буксування коліс. Електромеханічні давачі швидкості, що встановлюються на колеса лівого і правого бортів об'єкта і вимірюють кутові швидкості коліс, навпаки, нечутливі до процесів юзу та буксувань об'єкту. Тому, доцільно використовувати як один, так і другий тип давачів швидкості.

Для вимірювання дирекційного кута об'єкта використовується гіроскопічний давач ГККП, який має власний відхід від заданого напрямку, причому похибка в обчисленні місцезнаходження об'єкта за рахунок власного відходу ГККП значно перевищує похибку від неточного обчислення швидкості руху об'єкта. Тому доцільна корекція показань ГККП, яка враховує інформацію про швидкість руху лівого і правого бортів. Ця корекція досягається за допомогою спеціального алгоритму, що реалізується в ОКОНІ.

АНС характеризується достатніми миттєвими точностями, але згодом в них накопичуються похибки за рахунок постійного дрейфу гіроскопів ГККП і похибок обчислення швидкості. Тому досягнення задовільних точностей місце визначення  $X$ ,  $Y$  є неможливим після деякого часу роботи АНС. В той же час, СНС позбавлена зазначеного недоліку АНС і забезпечує високу точність визначення  $X$ ,  $Y$ , однак є неавтономною і незавадостійкою системою.

Комплексування давачів навігаційної інформації передбачає їх спільну обробку на базі алгоритмів комплексування навігаційної інформації.

Як уже було відмічено, основною складовою сумарної похибки визначення орієнтації і місцезнаходження є дрейф ГККП, а також випадкові похибки вимірювачів швидкості. Для зменшення цього впливу розробники паспортизують систематичні складові дрейфу з метою їх компенсації. Однак, випадкові складові дрейфу не піддаються паспортизації. Існує два основних підходи до розроблення методів зниження впливу випадкових складових на точність системи:

- при першому підході випадковий дрейф вводять у розширену математичну модель системи і вирішують задачу оптимальної похибки в динамічному коректованому фільтрі [4];

– при другому підході випадковий дрейф оцінюється наприкінці некоректованої ділянки роботи системи. Час некоректованої ділянки визначається реальними характеристиками давачів, що входять в систему і заданою точністю визначення навігаційних параметрів  $X$ ,  $Y$ ,  $\alpha$  [5, 6]. Другий підхід, що використаний в пропонованій системі, не вимагає апріорної інформації щодо статистичних характеристик дрейфу і більш простий для реалізації в бортових обчислювачах комплексованої обробки навігаційної інформації (ОКОНІ).

В ОКОНІ на основі алгоритму комплексування навігаційної інформації за інформацією, що надходить від давачів ДШР П, ДШР Л, ДШМ П, ДШМ Л, ГККП, СНС, або введеного вручну з БЕОМ, розраховується поточне місцезнаходження і кутова орієнтація бойової машини, що рухається по місцевості.

В системі передбачено три режими роботи в залежності від бойового завдання і наявності інформації від давачів:

- радіонавігаційний;
- автономний;
- комплексний.

Робота системи в радіонавігаційному режимі характеризується використанням інформації від СНС, а також від давачів одометричної системи (якщо вона працює). При цьому ГККУ може бути відключена або непрацездатна.

В автономному режимі роботи системи використовується інформація про кути орієнтації від ГККУ, а також дані про поздовжню лінійну швидкість, яка надходить від давачів ДШР, ДШМ і поперечну та вертикальну лінійні швидкості від ДЛШ.

Комплексний режим можливий, якщо працює СНС та ГККУ. При цьому, якщо працює здавачі ДШР, ДШМ, ДЛШ точність визначення параметрів орієнтації підвищується за рахунок компенсації уводу кута азимута. Комплексування інформації оснований на розрахунку очікуваної середньоквадратичної похибки навігаційних параметрів і визначенні допустимого часу руху бойової машини при заданих параметрах точності місцеположення і орієнтації в залежності від характеру бойового завдання.

З метою оцінки точності роботи запропонованої навігаційної системи в автономному режимі проведено імітаційне моделювання системи при реальних параметрах давачів. Отримані результати показують, що використання системи на бойовій машині БМ-2У дозволить отримати наступні параметри:

- а) кругова ймовірна похибка визначення поточних координат місця, не більше:
  - на відстань до 3 км,  $m - 10$ ;
  - на відстань більше 3 км – 0,3 % від пройденого шляху;
- б) середня квадратична похибка визначення дирекційного кута, п.к., – не більше 00–02;
- в) середня квадратична похибка визначення висоти, не більше:
  - на відстань до 3 км,  $m - 7,5$ ;
  - на відстань більше 3 км – 0,3 % від пройденого шляху.

#### Література

1. Анучин О.Н., Емельянцев Г.И. Интегрированные системы ориентации и нави-

гации для морских подвижных объектов. – СПб.: ИТМО, 1999 – 357с.

2. Иванов Ю.П. Комплексование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. – Машиностроение, 1984 – 207с.

3. Степанов О.А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации// Гироскопия и навигация. – 2002 - №1(36) – С.23-46.

4. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1998 – 370с.

5. Волчко П.І., Корольов В.М., Оліярник Б.О. та ін. Система управління машинами підрозділу на базі навігаційної системи «ТІУС-Н»//В кн.: V Міжнародний науково-технічний симпозіум “ Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS технології”. Львівське астрономо-геодезичне товариство. – Львів, 2001 – С.80-83.

6. Оліярник Б.А., Иванов В.И., Королев В.Н. и др. Использование танковой информационно-управляющей системы «ТІУС-Н» для модернизации реактивной системы залпового огня «ГРАД»//Механіка та машинобудування. – 2005 - №2 – С.218-224.

#### Bibliography (transliterated)

1. Anuchin O.N., Emelyantsev G.I. Integrirovannyye sistemy orientatsii i navigatsii dlya morskikh podvizhnykh ob'ektov. – SPb.: ITMO, 1999 – 357 p.

2. Ivanov Yu.P. Kompleksirovanie informatsionno-izmeritelnykh ustoystv letalnih aparatov. – Mashinostroenie, 1984 – 207 p.

3. Stepanov O.A. Integrirovannyye inertsiialno-sputnikovyie sistemyi navigatsii Giroskopiya i navigatsiya. – 2002 - #1(36) – p.23-46.

4. Stepanov O.A. Primenenie teorii nelineynoy filtratsii v zadachah obrabotki navigatsionnoy informatsii. – SPb.: TsNII «Elektropribor», 1998 – 370p.

5. Volchko P.I., Korolov V.M., Oliyarnik B.O. ta in. Sistema upravlinnya mashinami pidrozdilu na bazi navigatsiynoyi sistemi “TIUS-N” V kn.: V Mizhnarodniy naukovotekhnichniy simpozium “ Geoinformatsiyniy monitoring navkolishnogo seredovischa: GPS i GIS tehnologiyi”. Lvivske astronomo-geodezichne tovaristvo. – Lviv, 2001 – p.80-83.

6. Oliyarnik B.A., Ivanov V.I., Korolev V.N. i dr. Ispolzovanie tankovoy informatsionno-upravlyayuschey sistemyi «TIUS-N» dlya modernizatsii reaktivnoy sistemyi zalpovogo ognya «GRAD» Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2005 - #2 – p.218-224.

УДК 623.647

Оліярник Б.А., Бондарук А.Б., Глебов В.В., Евтушенко К.С.

### **ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ ПОДВИЖНЫХ БОЕВЫХ МАШИН**

Предложена структура и определены основные характеристики интегрирован-

ной системы навигации для подвижных боевых машин. Система построена на основе комплексированной обработки навигационной информации, получаемой от спутниковой и автономной одометрической систем. Комплексирование информации основано на расчете прогнозирования среднеквадратической погрешности навигационных параметров, и определении допустимого времени работы при заданных параметрах точности. Приведены основные параметры системы.

УДК 681.325.5

Оліярник Б.О., Бондарук А.Б., Мошнін В.М., Чайковський Р.І.

### **ІНТЕГРОВАНА ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОГНЕМ ДЛЯ БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН**

Актуальною задачею сучасного стану розвитку озброєння бойових броньованих машин є ефективно рішення задач наведення і стабілізації, розрахунок поправочних кутів прицілювання і бокового упередження, а також автоматизації процесів заряджання [1].

Виходячи з цих вимог до задач керування вогнем, запропонована структура інформаційно-керуючої системи (ІКС), яка максимально уніфікована для вирішення задач керування вогнем, а саме: автоматичного наведення і стабілізації гармати, обчислення балістичних поправок, вимірювання початкової швидкості вильоту снаряда, керування механізмами заряджання і пострілом [2,3]. Запропонована структура дозволила, з одного боку, забезпечити максимальну завершеність задач у кожному виробі і мінімізувати взаємний обмін параметрів під час сумісної роботи, з другого боку – збільшувати обсяги задач системи за рахунок нарощування виробів, використовуючи для вирішення задач всю сукупність реальних параметрів об'єкта, об'єднаних єдиним інформаційним полем.

Сучасна система управління вогнем високої ефективності для вирішення вогневих задач повинна працювати з максимально можливою сукупністю реальних параметрів бронеоб'єкта, реальних параметрів середовища (атмосферний тиск, температура, сила вітру) і реальних параметрів самого снаряда (початкова швидкість). При вирішенні вищевказаних проблем на борту бронеоб'єкта виникають задачі як вимірювання необхідних параметрів, так і передачі їх у різні підсистеми для врахування при видаванні сигналів керування. При цьому, частина параметрів, необхідних одній системі, може побічно або прямо існувати в іншій і використовуватися під час вирішення різних задач. Наприклад, власна швидкість використовується як для вирішення задач керування двигуном і трансмісією, так і для вирішення навігаційних задач, задач захисту, задач керування вогнем під час руху.

Одним з основних факторів, які визначають ймовірність ураження цілі, є ймовірність попадання. Ймовірність попадання залежить від ряду причин, які можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться похибки системи "ствол-снаряд", на які системи керування практично не впливають. До другої відносяться помилки системи керування вогнем. При цьому, значення похибки зменшується у випадку врахування в балістичному обчислювачі при визначенні кутів прицілювання та бокового випередження більшої кількості параметрів при розрахунку зовнішньої балістики снаряда. Але при цьому похибка сумується із похибкою наведення і стабілізації гармати в підсистемі стабілізації.

Другим важливим фактором ймовірності ураження є час підготовки пострілу. Час підготовки пострілу залежить від структури системи керування вогнем. Одним із шляхів зменшення часу підготовки пострілу є створення інтегрованої системи керування вогнем, яка дозволить мінімізувати час підготовки пострілу за рахунок суміщення виконуваних операцій.

Вирішення задачі одержання та обробки великої кількості реальних параметрів, що використовуються при керуванні різними пристроями в бортовій апаратурі, неможливе шляхом простого дублювання давачів і кабелів, тому що це суттєво збільшує габарити і вагу апаратури і залишає при цьому усе менше місця для боезапасів і інших життєво важливих функцій.

Розроблена ІКС системи керування вогнем танка побудована за архітектурою відкритої системи, складові якої максимально уніфіковані для вирішення задач керування вогнем. Структура системи наведена на рис. 1.

Виходячи з контурів керування озброєння, для вирішення задач керування вогнем в структурі передбачено чотири виробу:

- "ТИУС-С" – для вирішення задач наведення і стабілізації гармати;
- "ТИУС-В" – для вирішення задач визначення кутів прицілювання і випередження;
- "ТИУС-И" – для вирішення задач вимірювання початкової швидкості вильоту снаряда;
- "ТИУС-АЗ" – для вирішення задач керування механізмами заряджання і пострілом.

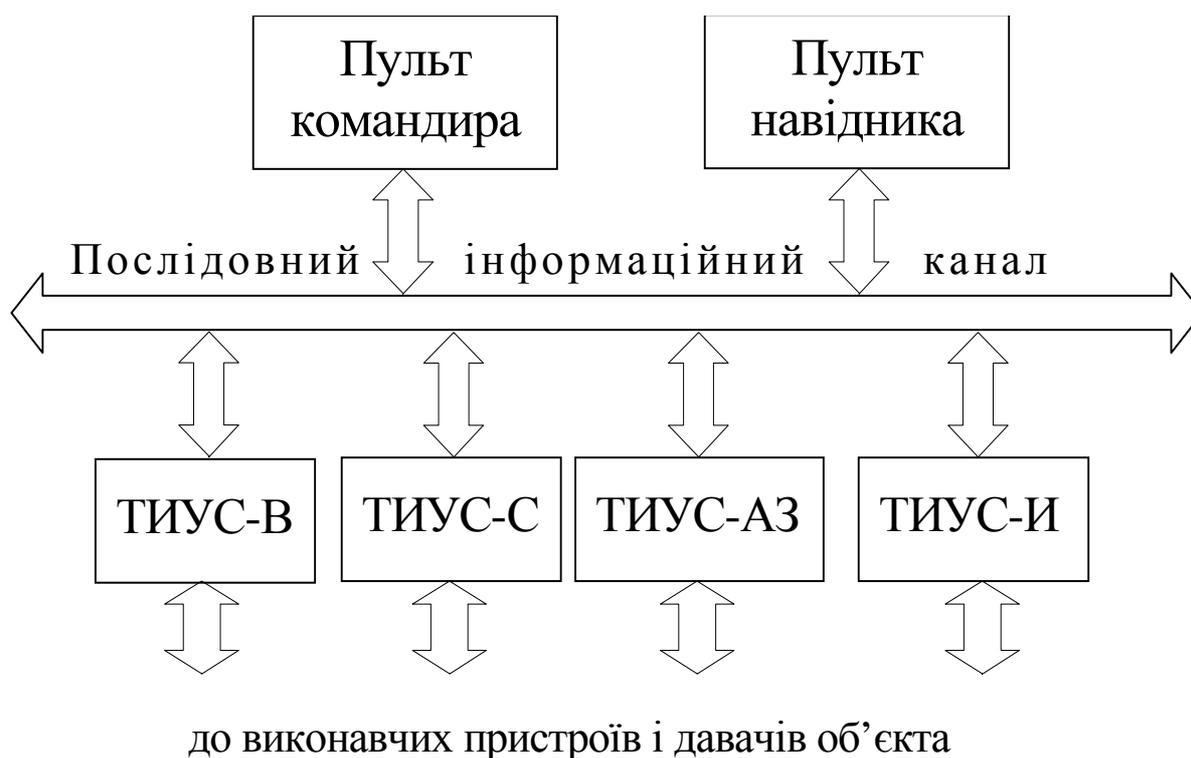


Рисунок 1 – Структура ІКС керування вогнем

Виріб "ТИУС-В" виконує задачу обчислення кутів прицілювання та бокового випередження гармати залежно від дальності до цілі з врахуванням таких параметрів: відносної кутової швидкості цілі; кута нахилу башти; курсового кута, власної швидкості та швидкості цілі; температури заряду; типу снаряда; вигину ствола танка, поправки на індивідуальний кут вильоту снаряда, швидкості вильоту, яка визначається виробом "ТИУС-И"; швидкості вітру; температури повітря; атмосферного тиску. Значення сиг-

налів, які відповідають обчисленим кутам прицілювання та бокового випередження, додаються з урахуванням їх знаків до значень сигналів від давачів відповідно вертикального та горизонтального наведення. Ці сумарні значення у виробі "ТИУС-С" враховуються під час відпрацювання задачі стабілізації гармати.

Виріб "ТИУС-А3" виконує задачу пошуку відповідного типу снаряда в конвеєрі, проведення циклів з доставки снаряда у ствол і видачі команди на постріл, з врахуванням обчислених параметрів пружних коливань гармати на основі даних виробів "ТИУС-В" і "ТИУС-С".

У виробках максимально замкнуті функції і мінімізований взаємний обмін параметрами під час спільної роботи. Такий принцип ділення дозволяє використовувати автономно вироби для різних типів бойових броньованих машин.

Сьогодні сучасні танки вітчизняного виробництва обладнані двоплощинною системою наведення і стабілізації озброєння: гармата стабілізується у вертикальній площині, а башта з гарматою – в горизонтальній площині.

В контурі стабілізації башти (горизонтальна площина) діють такі збурюючі фактори: кутова швидкість корпусу в горизонтальній площині, моменти, обумовлені поперечними коливаннями корпусу і його лінійними прискореннями при поперечних переміщеннях, моменти, обумовлені тертям і неврівноваженістю башти.

В контурі стабілізації гармати (вертикальна площина) діють такі збурюючі фактори: кутова швидкість корпусу при його поздовжніх коливаннях, моменти обумовлені поздовжніми і вертикальними лінійними переміщеннями корпусу, момент тертя в цапфах люльки, момент неврівноваженості гармати. Реакцією системи наведення і стабілізації на дію збурюючих факторів є створення протидіючих стабілізуючих моментів і швидкостей наведення. Похибка стабілізації тим менша, чим більш повно стабілізуючий момент і швидкість виконавчих пристроїв компенсують збурюючі моменти і швидкості.

З участі у тендерах інозамовників відомо, що випробування танків проводиться на трасах "підвищеної складності". Ці випробування показали, що існуючі аналогові стабілізатори не забезпечують достатню компенсацію збурюючих моментів і швидкостей, які при цьому виникають. Такі стабілізатори можуть забезпечувати стійке регулювання швидкостей наведення в діапазоні, який дорівнює  $\omega_{\max}/\omega_{\min} \approx 600$ . Подальше розширення діапазону регулювання швидкості і якості стабілізації вимагає застосування алгоритмів керування, що базуються на зміні структури і параметрів алгоритмів в процесі роботи, що практично є неможливим в аналогових блоках керування. Застосування ж цифрової техніки дає суттєві переваги під час автоматизації процесів настройки.

Для побудови системи, що складається з блоків управління та інтегрованих пультів для членів екіпажу, розроблена та пропонується до використання в різних броньованих об'єктах низка обчислювальних модулів: від звичайних одно кристальних мікро контролерів для попередньої обробки аналогових та унітарних сигналів до складних швидкодіючих обчислювачів на базі процесорів 486 і Elan 400, 520 зі стандартною DOS 6.22 і оригінальною операційними системами [4].

Пропоновані вироби пройшли всі випробування в рамках ДКР, а також у інозамовників, прийняте рішення щодо їх серійного випуску для різних модифікацій танка Т-84 (наприклад, танк Т84-120 "Ятаган"). Виріб "ТИУС-С" також успішно використовується для вирішення задач стабілізації бойових модулів "Гром" для легкоброньованої техніки (БТР-80).

Література

1. Борисюк М.Д., Мошнин В.Н., Оліярник Б.О. Повышение основных характеристик изделий бронетанковой техники за счет внедрения цифровых информационно-управляющих систем // Науково-технічний журнал “Механіка та машинобудування” 2006 – №2 – С. 121–126.
2. Оліярник Б.О., Бондарук А.Б. Інтегрована інформаційно-керуюча система для бронетехніки // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. Перспективи розвитку озброєння і військової техніки в Збройних силах України. 4–5 березня 2008 р.
3. Оліярник Б.О. Структура інформаційно-керуючої системи управління вогнем сучасного танка // Вісник Тернопільського Державного університету. 2006 – Вип. 3 – Т.11 – С. 140–144.
4. Глухов В.С., Заїченко Н.В., Іванов В.І., Оліярник Б.О., Тупиця А.В. Обчислювальні модулі для бортових інформаційно-керуючих систем бронетанкової техніки // Науково-технічний журнал “Механіка та машинобудування”. 2006 – №1 – С. 115–123.

Bibliography (transliterated)

1. Borisyuk M.D., Moshnin V.N., Oliyarnik B.O. Povyishenie osnovnyih harakteristik izdeliy bronetankovoy tehniki za schet vnedreniya tsifrovyyih informatsionno-upravlyayuschih sistem Naukovo-tehnichniy zhurnal “Mehanika ta mashinobuduvannya” 2006 – #2 – p. 121–126.
2. Oliyarnik B.O., Bondaruk A.B. Integrovana informatsiyno-keruyucha sistema dlya bronetehniki Zbirnik tez dopovidey Vseukrayinskoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi. Perspektivi rozvitku ozbroennya i viyskovoyi tehniki v Zbroynih silah Ukrayini. 4–5 bereznya 2008 r.
3. Oliyarnik B.O. Struktura informatsiyno-keruyuchoyi sistemi upravlinnya vognem suchasnogo tanka VIsnik Ternopilskogo Derzhavnogo universitetu. 2006 – Vip. 3 –T.11 – p. 140–144.
4. Gluhov V.S., Zayichenko N.V., Ivanov V.I., Oliyarnik B.O., Tupitsya A.V. Obchislyvalni moduli dlya bortovih informatsiyno-keruyuchih sistem bronetankovoyi tehniki Naukovo-tehnichniy zhurnal “Mehanika ta mashinobuduvannya”. 2006 – #1 – p. 115–123.

УДК 681.325.5

Оліярник Б.А., Бондарук А.Б., Мошнин В.Н., Чайковский Р.И.

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА  
УПРАВЛЕНИЯ ОГНЕМ ДЛЯ БОЕВЫХ БРОНИРОВАННЫХ МАШИН**

Предлагается структура интегрированной цифровой системы управления огнем, построенной за принципом открытой распределенной системы, которая максимально унифицированная для решения задач управления устройствами боевых бронированных машин. Предложенная структура позволяет, с одной стороны, обеспечить максималь-

ную законченность задачи управления в отдельной системе и минимизировать обмен параметров для совместной работы систем, а с другой – увеличивать объемы задач за счет наращивания систем (подсистем), используя для решения новых задач весь объем реальных параметров объекта, присутствующих в полной системе.

## **АНОТАЦІЙНИЙ ЗМІСТ**

Tovazshneanski L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyryev S.A.,  
Melnikovska L.A., Tereschenko V.V.

### **PROCESS INTEGRATION OF ORTHOPHOSPHORIC ACID CONCENTRATION**

The grid diagram for orthophosphoric acid concentration process was created. This diagram stated base for retrofit flowsheet building. Retrofit of the process concentration will decrease the use of hot utilities on the 2206 kW and cool utilities on 3044 kW. Pay back period of retrofit project will be 23 months.

Anipko O.B., Biryukov I.Y., Busyak Y.M., Kanishjev S.P., Perekhod A.N.

### **ON INTERIOR BALLISTICS PARAMETERS EFFECT ON TANK ARMAMENT SURVIVABILITY**

The article presents the factors affecting the tank armament survivability and finds relation between the maximum pressure and the initial velocity for rounds with the shelf life more than guaranteed.

Anipko O.B., Borysiuk M.D., Busyak Y.M.

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF HOME AND FOREIGN COMBAT TANKS BASED ON THE RATIONALITY LEVEL COMPARATIVE METHOD**

In the paper given is a comparative analysis of different types of home and foreign combat tanks based on the rationality level comparative method, complex parameters as well as on the simulation results, experimental studies involving armored vehicles and heuristic examination results obtained.

Bibik D.V.

### **ON AN ISSUE OF HYDROVOLUMETRIC MECHANICAL TRANSMISSION**

The article is devoted to reviewing a progress in creating the hydrovolumetric transmissions of radial type with ball pistons. The completeness of studying design issues of hydrovolumetric transmissions of GOP-900 type is analyzed, as well as trends of further studying are mapped out.

Birukov I.Y., Baulin D.S.

### **OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SMALL ARMS AT USE OF AMMUNITIONS OF LONG TIME STORAGE**

In article is considered influence of periods storage ammunitions on operational characteristics of small arms. Are offered the model of operation ammunitions at various stages of storage and practical recommendations on their further use.

Borysiuk M.D., Klimov V.F., Anipko O.B., Maqeramov L.K.-A., Kolbasov A.N., Kudrevatykh D.N.

### **HIGH-PERFORMANCE AIR CLEANING SYSTEM FOR ARMY TRACKED VEHICLES**

The article states the necessity of developing a reliable air cleaning system for army tracked vehicles. Presented is the data of the air cleaning system of diesel and gas-turbine engines, developed are the main ways of improvement of the air cleaning systems.

### **INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF PROCESSES OF DEHYDRATION OF FOOD RAW MATERIALS**

Article is devoted questions of creation of thermomechanical units on the basis of rotating thermosiphons (RTS). The analysis of technologies of thermal processing, concentrating liquid products, drying of disperse materials is made. Problems are revealed and decision ways are defined. Classification of thermomechanical units is resulted. Application of devices with RTS for various foodstuffs is considered. Results of experimental modeling of heat – mass exchange in devices with RTS are resulted. Calculation and the analysis of efficiency of application of the device in technological lines are made. Prospects of designs of independent thermomechanical units, their functional problems and the advantages, expected effect are considered.

Gubinsky M., Shishko Y., Shevchenko G., Usenko A., Fedorov S., Kremneva K.

### **THE RESEARCHES OF BIOMASS PYROLYSIS PROCESS IN THE DENSE LAYER**

The object of researches was the biomass pyrolysis process. It was creative the experimental installation for carry out of pyrolysis with getting heat energy. The pyrolysis in the dense layer with getting pyrolysis gas and carbon was realized. As results of carry out researchers was definite the rational air consumption, the range of working temperature and length of pyrolysis.

Foris S.N., Fedorov S.S., Fedorov O.G.

### **THE RESEARCH OF GAS VORTICAL DIFFUSION INFLUENCE ON LIMEKILNING FURNACE WORK**

The mathematical model of gas shaft limekilning furnace was created. The model takes account of outside and inside heat exchange, fluid dynamics, convection and diffusion substance transfer, fuel combustion. On the base of numerical researches is established that consideration of vortical diffusion improves the accuracy of calculations in modeling process.

Oliyarnyk B.A., Bondaruk A.B., Glebov V.V., Yevtushenko K.S.

### **THE INTEGRATED SYSTEM OF ORIENTATION AND NAVIGATION OF MOBILE FIGHTING VEHICLES**

In the article the structure of the integrated system of navigation of mobile fighting vehicles is presented and main system characteristics are determined.

The system is formed on the basis of integral processing of real-time navigating information from satellite and independent odometric system. The integral information processing is based on the computations of the prediction of navigation parameters RMS error and calculations of allowable operating time for the given parameters of accuracy. The basic system parameters are presented.

Oliarnyk B.A., Bondaruk A.B., Moshnin V.N., Chajkovskij R.I.

### **THE INTEGRATED OF CONTROL SYSTEM OF FIRE FOR THE BATTLE RESERVED MACHINES**

Offers a structure of a tank control system of fire constructed by a principle of the open distributed system, which is unified as much as possible for solving the tasks of managing of tank devices. The offered structure allows on the one side at maximum to close functions and to reduce to a minimum interchange of parameters at share operation object systems work, with another side - to increase size of tasks at the expense of escalating of an amount of systems (subsystems), using thus all collection of actual parameters of the object existing in the full system.