



TAGUCHI-BASED OPTIMIZATION OF AIR-GAP MEMBRANE DISTILLAT

Akhatov Jasurjon -Doctor of Technical Sciences, Professor,

<https://orcid.org/0000-0002-1637-1389> e-mail: jahatov@gmail.com

Kuralov Murodbek - PhD student,

<https://orcid.org/0000-0002-3677-2673> e-mail: makuralov@gmail.com

Juraev Tukhtamurod -Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD),

<https://orcid.org/0000-0003-2590-7621> e-mail: jtukhtamurod94@gmail.com

Halimov Akbar - Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD)

<https://orcid.org/0000-0001-9499-594X> e-mail: akbar.halimov@rwth-aachen.de

Physical-technical Institute named after S.A. Azimov of Uzbekistan Academy of Sciences,
Chingiz Aytmatov str. 2^b, 100084 Tashkent, Uzbekistan

Abstract. *This study investigates the optimization of the performance of an Air Gap Membrane Distillation (AGMD) system using orthogonal experimental design based on the Taguchi method. Four key operating parameters were considered: feed water temperature (T_1), cooling water temperature (T_2), feed flow rate (V_1), and cooling flow rate (V_2). Each parameter was varied at two levels according to a fractional factorial L_8 orthogonal array. Process performance was evaluated using three main indicators: distillate flux, distillate mass, and product electrical conductivity. The experiments were conducted under steady-state conditions at $T_1 = 70$ and 80 °C, $T_2 = 20$ and 25 °C, with flow rates ranging from 100 to 150 L/h. The obtained results showed that distillate flux varied from 36.72 to 122.11 L/h, distillate mass ranged from 0.158 to 1.328 kg, and electrical conductivity ranged from 1.23 to 3.69 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.*

Taguchi analysis revealed that feed water temperature (T_1) was the most significant factor affecting the variability of distillate flux and distillate mass, contributing 56.4% and 69.8%, respectively. Increasing T_1 from 70 to 80 °C resulted in a reduction of both distillate flux and distillate mass by more than 60%, likely due to enhanced boundary layer polarization and partial membrane wetting. Product conductivity increased with rising T_1 and T_2 , while showing minimal dependence on V_1 , indicating possible membrane integrity deterioration under elevated temperature conditions.

The optimal compromise solution—achieving maximum distillate flux (118 L/h) with high product quality (1.3 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)—was obtained under the following operating conditions: $T_1 = 70$ °C, $T_2 = 20$ °C, $V_1 = 150$ L/h, and $V_2 = 100$ L/h.

Materials and Methods. *Experiments were conducted on a laboratory-scale air-gap membrane distillation (AGMD) unit at PURA-Lab (PSA, CIEMAT, Spain) using a flat-sheet hydrophobic PTFE membrane with a 3 mm air gap. Feed and coolant streams were circulated in counter-current mode, and temperatures were controlled by thermostatic baths (± 0.5 °C). Optimization was performed using Taguchi orthogonal experimental design (L_8 array) for four factors: feed temperature ($T_1 = 70$ – 80 °C), coolant temperature ($T_2 = 20$ – 25 °C), feed flow rate ($V_1 = 100$ – 150 L/h), and coolant flow rate ($V_2 = 100$ – 150 L/h). Permeate flux, distillate mass, and product conductivity were evaluated under steady-state conditions followed by statistical response analysis.*

Results. *Experimental analysis showed that permeate flux ranged from 36.72 to 122.11 L/h, distillate mass from 0.158 to 1.328 kg, and product conductivity from 1.23 to 3.69 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Taguchi analysis identified feed temperature (T_1) as the dominant factor, contributing over 56% to flux variation and nearly 70% to distillate mass. Optimal conditions yielded 118 L/h with high product purity.*

Keywords. *Air-gap membrane distillation, Taguchi method, distillate, desalination.*

Дата поступления: 20.02.2026. После обработки: 28.02.2026 Принято печать: 24.03.2026





For citation: Akhatov J., Kuralov M., Juraev T., Halimov A. Taguchi-Based Optimization of Air-Gap Membrane Distillat. *Alternative Energy*. 2026. 1(22). pp. 19-30. (In Rus.)

ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЗДУШНО-ЗАБОРНОЙ МЕМБРАННОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТАГУЧИ

Ахатов Жасуржон - доктор технических наук, профессор,
<https://orcid.org/0000-0002-1637-1389>, e-mail: jahatov@gmail.com

Куралов Муродбек - аспирант,
<https://orcid.org/0000-0002-3677-2673>, e-mail: makuralov@gmail.com

Жураев Тухтамурод - доктор философии по техническим наукам (PhD),
<https://orcid.org/0000-0003-2590-7621>, e-mail: jtukhtamurod94@gmail.com

Халимов Акбар - доктор философии по техническим наукам (PhD),
<https://orcid.org/0000-0001-9499-594X>, e-mail: akbar.halimov@rwth-aachen.de

Физико-технический институт им. С.А. Азимова Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Чингиза Айтматова, 26, 100084, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В работе исследуется оптимизация производительности установки воздушно-заборной мембранной дистилляции (AGMD) с использованием ортогонального экспериментального планирования на основе метода Тагути. Были рассмотрены четыре ключевых рабочих параметров такие как, температура исходной воды (T_1), температура охлаждающей жидкости (T_2), расход исходной воды (V_1) и расход охлаждающей жидкости (V_2), каждый из которых варьировался на двух уровнях в соответствии с дробно-факторным ортогональным массивом L_8 . Эффективность процесса оценивалась по трём ключевым показателям: поток дистиллята, масса дистиллята и удельная электропроводность продукта. Эксперименты выполнены в установившемся режиме при $T_1 = 70$ и 80 °C, $T_2 = 20$ и 25 °C, а расходы находились в диапазоне 100–150 л/ч. Полученные значения составили: поток дистиллята от 36,72 до 122,11 л/ч, масса дистиллята от 0,158 до 1,328 кг, удельная электропроводность от 1,23 до 3,69 мкСм·см⁻¹.

Результаты показали, что температура исходной воды (T_1) является наиболее значимым фактором, влияющим на изменчивость потока дистиллята и массы дистиллята, с вкладом 56,4 % и 69,8 % соответственно. Повышение T_1 с 70 до 80 °C привело к снижению как потока дистиллята и массы дистиллята более чем на 60 %, что, вероятно, обусловлено усилением поляризации пограничного слоя и частичным смачиванием мембраны. Электропроводность продукта увеличивалась с ростом температур T_1 и T_2 , но практически не зависела от изменения V_1 , что свидетельствует о нарушении целостности мембраны под действием температуры.

Оптимальное компромиссное решение, максимальный поток дистиллята (118 л/ч) при высоком качестве продукта (1,3 мкСм·см⁻¹) было достигнуто при следующих условиях: $T_1 = 70$ °C, $T_2 = 20$ °C, $V_1 = 150$ л/ч, $V_2 = 100$ л/ч.

Материалы и методы. Эксперименты проводились на лабораторной установке воздушно-заборной мембранной дистилляции (AGMD) PURA-Lab (PSA, CIEMAT, Испания) с использованием плосколистовой гидрофобной PTFE-мембраны и воздушного зазора 3 мм. Питающий и охлаждающий потоки циркулировали в противоточном режиме; температуры поддерживались термостатами ($\pm 0,5$ °C). Оптимизация выполнялась методом ортогонального планирования Тагути (массив L_8) для четырёх факторов: температура исходной воды ($T_1 = 70$ – 80 °C), температура охлаждающей жидкости ($T_2 = 20$ – 25 °C), расход исходной воды ($V_1 = 100$ – 150 л/ч) и расход охлаждающей жидкости ($V_2 = 100$ – 150 л/ч). Оценивались поток, масса дистиллята и электропроводность продукта в установившемся режиме с последующей статистической обработкой откликов.





Результаты. Экспериментальный анализ показал, что поток дистиллята варьировался в диапазоне 36,72–122,11 л/ч, масса дистиллята — 0,158–1,328 кг, а электропроводность продукта — 1,23–3,69 μS см⁻¹. Метод Тагучи выявил доминирующее влияние температуры исходной воды (T_1), обеспечивающей свыше 56 % вклада в поток и около 70 % — в массу дистиллята. Оптимальные условия обеспечили 118 л/ч при высокой чистоте продукта.

Ключевые слова: воздушно-зазорная мембранная дистилляция, метод Тагучи, дистиллят, опреснение.

TAGUCHI USULI ASOSIDA HAVO BO'SHLIQLI MEMBRANALI DISTILLATSIYA JARAYONINI OPTIMALLASHTIRISH

Axatov Jasurjon-texnika fanlari doktori, professor,

<https://orcid.org/0000-0002-1637-1389>, e-mail: jahatov@gmail.com

Kuralov Murodbek – tayanch doktorant,

<https://orcid.org/0000-0002-3677-2673>, e-mail: makuralov@gmail.com

Juraev Tuxtamurod - texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

<https://orcid.org/0000-0003-2590-7621>, e-mail: jtukhtamurod94@gmail.com

Halimov Akbar-texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

<https://orcid.org/0000-0001-9499-594X>, e-mail: akbar.halimov@rwth-aachen.de

¹O'zbekiston Fanlar akademiyasi Fizika-texnika instituti, Chingiz Aytmatov ko'ch., 2b, 100084, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya. Ushbu ishda Taguchi usuliga asoslangan ortogonal eksperimental rejalashtirishdan foydalangan holda havo qatlamli membranali distillash (AGMD) qurilmasining ish unumdorligini optimallashtirish tadqiq qilingan. Tadqiqotda boshlang'ich suv harorati, sovutish suyuqligi harorati, boshlang'ich suv sarfi va sovutish suyuqligi sarfi kabi to'rtta asosiy ishchi parametr ko'rib chiqildi. Ularning har biri L8 drob-faktorli ortogonal massivga muvofiq ikki darajada o'zgartirildi. Jarayon samaradorligi distillat oqimi, distillat massasi va mahsulotning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi kabi uchta ko'rsatkich bo'yicha baholandi. Eksperimentlar barqaror rejimda boshlang'ich suv harorati 70 va 80 °C, sovutish suyuqligi harorati 20 va 25 °C hamda sarf miqdori 100–150 l/soat oralig'ida o'tkazildi. Olingan natijalarga ko'ra distillat oqimi 36,72 dan 122,11 l/soatgacha, distillat massasi 0,158 dan 1,328 kg gacha va solishtirma elektr o'tkazuvchanlik 1,23 dan 3,69 mkSm/sm gacha ko'rsatkichlarni tashkil etdi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, boshlang'ich suv harorati distillat oqimi va massasining o'zgaruvchanligiga ta'sir qiluvchi eng muhim omil bo'lib, uning ulushi mos ravishda 56,4 foiz va 69,8 foizga teng bo'ldi. Haroratning 70 dan 80 °C gacha ko'tarilishi distillat oqimi va massasining 60 foizdan ko'proqqa kamayishiga olib keldi, bu esa ehtimol chegara qatlamining qutblanishi kuchayishi va membrananing qisman namlanishi bilan bog'liq. Mahsulotning elektr o'tkazuvchanligi harorat ko'tarilishi bilan ortdi, ammo suv sarfi o'zgarishiga deyarli bog'liq bo'lmadi. Bu holat harorat ta'sirida membranaga zarar yetganidan dalolat beradi. Eng maqbul yechim sifatida mahsulotning yuqori sifati bilan birga maksimal distillat oqimi boshlang'ich suv harorati 70 °C, sovutish suyuqligi harorati 20 °C va suv sarfi 150 l/soat bo'lganda qayd etildi.

Materiallar va usullar. Eksperimentlar PURA-Lab laboratoriya havo qatlamli membranali distillash qurilmasida yassi varoqli gidrofob PTFE-membranadan foydalangan holda o'tkazildi. Oziqlantiruvchi va sovutuvchi oqimlar qarama-qarshi yo'nalishda harakatlantirildi hamda haroratlar termostatlar yordamida aniq ushlab turildi. Optimallashtirish to'rtta omil uchun Taguchi ortogonal rejalashtirish usuli orqali amalga oshirildi. Jarayonda oqim, distillat massasi va mahsulotning elektr o'tkazuvchanligi barqaror rejimda baholanib, natijalar statistik tahlil qilindi.

Natijalar. Eksperimental tahlil shuni ko'rsatdiki, distillat oqimi, massasi va elektr o'tkazuvchanligi belgilangan diapazonlarda o'zgardi. Taguchi usuli boshlang'ich suv haroratining ustun ta'sirini aniqladi va u oqimning 56 foizdan ortig'ini hamda distillat massasining qariyb 70 foizini belgilab berdi. Optimal sharoitlar mahsulotning yuqori tozaligida soatiga 118 litr unumdorlikni ta'minladi.

Kalit so'zlar. havo qatlamli membranali distillash, Taguchi usuli, distillat, chuchuklashtirish.

1. Введение

Во всём мире более 2 миллиардов человек не имеют доступа к безопасной питьевой воде. Ещё тревожнее то, что от 2 до 3 миллиардов человек ежегодно сталкиваются с нехваткой воды как минимум один месяц [1], [2]. По оценкам Организация Объединённых Наций, если текущие тенденции потребления продолжатся, к 2030 году доступ к пресной воде будет обеспечен лишь примерно на 60 %, что приведёт к примерно 40 % дефициту в обеспечении глобального спроса. Этот хронический водный стресс обусловлен ростом населения, урбанизацией, индустриализацией и климатическими изменениями в доступности водных ресурсов. Особенно эта проблема проявляется в странах Центральной Азии, в частности Узбекистан сталкивается с серьёзным дефицитом воды в результате засушливого климата и чрезмерной эксплуатации речных источников [3].

В засушливых и густонаселённых регионах традиционные источники пресной воды такие как реки, подземные воды уже не справляются с растущими потребностями, и правительства всё чаще обращаются к нетрадиционным источникам [4], [5]. В таких условиях технологии опреснения рассматриваются как решения для обеспечения доступа к чистой воде [6].

Мембранная дистилляция (MD) является термически управляемый процессом, который способен эффективно функционировать при относительно низких температурах 40–80 °C исходной воды.

Это позволяет интегрировать MD системы с солнечными коллекторами, геотермальными источниками или установками утилизации промышленного вторичного тепла [7], [8]. Упрощённая схема механизма переноса вещества в процессе мембранной дистилляции приведена на рисунке 1.

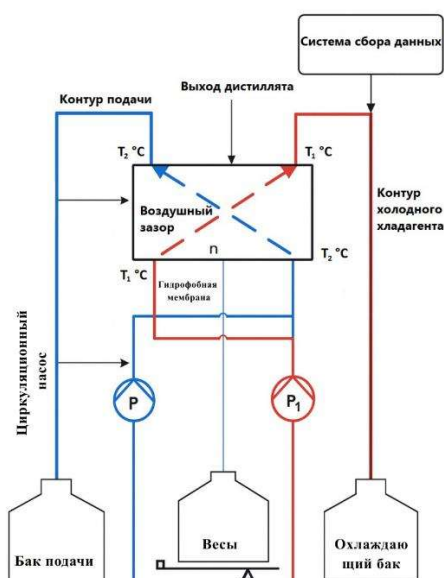


Рис. 1. Схематическое представление принципа работы мембранной дистилляции.

Среди различных конфигураций мембранной дистилляции воздушно-зазорная мембранная дистилляция представляет особый интерес, поскольку в лабораторных условиях позволяет получать продукт с удельной электропроводностью менее 10 мкСм·см⁻¹ и достигать термического КПД до 70 % [9]. Производительность AGMD систем чувствительна



к рабочим параметрам. Поток дистиллята, это основной показатель производительности и может изменяться более чем на 200 % даже при незначительных вариациях температуры исходной воды. Повышение температуры исходной воды с 50 до 70 °С, согласно литературным данным, увеличивает поток получаемой очищенной воды с 20 до 60 л·м⁻²·ч⁻¹ [10]. Однако дальнейшее повышение температуры до 80 °С и выше часто приводит к снижению или нестабильности потока вследствие смачивания мембраны и усиления тепловой поляризации [11]. При этом температура охлаждающей жидкости напрямую определяет величину градиента парциального давления водяного пара через мембрану. Снижение температуры охладителя с 25 до 15 °С способно увеличить поток на 15–25 %, однако сопровождается ростом энергозатрат на перекачку и усложнением конструкции мембранной системы [12], [13], [14].

Для системного анализа подобных компромиссов необходима экспериментальная оптимизация. Полный факторный эксперимент с четырьмя факторами на двух уровнях потребовал бы 16 испытаний, тогда как метод Тагучи позволяет сократить объём до всего 8 опытов с использованием ортогонального массива L₈ [9]. Это снижает затраты времени и ресурсов на 50 % при сохранении статистической достоверности результатов. Подобная эффективность особенно важна на ранних этапах разработки процессов, особенно в условиях ограниченных ресурсов.

Недавние исследования [10] подтверждают эффективность применения метода Тагучи для оптимизации режимных параметров мембранной дистилляции. В AGMD системе при оптимизированных условиях был достигнут максимальный поток 76,0 л·м⁻²·ч⁻¹, тогда как в другой работе при аналогичном подходе к планированию эксперимента была обеспечена удельная электропроводность дистиллята на уровне 1,2 мкСм·см⁻¹ [7].

Несмотря на указанные достижения, лишь немногие исследования одновременно оценивают несколько ключевых показателей: поток очищенной воды, общую массу дистиллята и удельную электропроводность в рамках статистически обоснованного плана эксперимента. В большинстве работ основное внимание уделяется исключительно максимизации потока [7], что может привести к ущербу для качества продукции или долгосрочной стабильности процесса [15]. Высокие расходы исходной воды более 150 л/ч, могут увеличить поток на 20 % за счёт снижения концентрационной поляризации, но одновременно повышают энергопотребление без улучшения качества воды [9]. При низком расходе охлаждающей жидкости менее 100 л/ч, могут увеличить время конденсации и суммарный выход дистиллята, однако создают риск затопления воздушного зазора конденсатом [10].

Настоящая работа направлена на устранение указанных пробелов путём применения ортогонального планирования эксперимента на основе метода Тагучи к лабораторной AGMD установке с количественной оценкой относительного влияния четырёх ключевых параметров, а именно температуры исходной воды 70 и 80 °С, температуры охладителя 20 и 25 °С, расхода исходной воды 100 и 150 л/ч и расхода охладителя 100 и 150 л/ч, на три критических отклика, включающие поток дистиллята в диапазоне от 36,7 до 122,1 л/ч, массу дистиллята от 0,16 до 1,33 кг и удельную электропроводность от 1,23 до 3,69 мкСм·см⁻¹.

С использованием ортогонального массива L₈ рассчитаны средние значения откликов по уровням факторов, размахи эффектов (Δ) и относительные вклады, что позволило идентифицировать доминирующие переменные. Предварительный анализ показал, что только температура исходной воды объясняет более 56 % изменчивости потока дистиллята и около 70 % изменчивости массы дистиллята.

Полученные результаты обеспечивают практические, основанные на данных рекомендации по оптимизации AGMD систем, работающих от низкопотенциального тепла менее чем 90 °С, что представляет особую значимость для децентрализованных солнечных опреснительных установок в засушливых и удалённых регионах, таких как Центральная Азия, где более 40 % сельских общин испытывают хронический дефицит надёжного доступа к пресной воде [16], [17].



2. Методология

А. Полный факторный и ортогональный планы экспериментов

В экспериментальных исследованиях, включающих множество регулируемых факторов, крайне важно понимать как индивидуальное, так и совместное влияние этих факторов на производительность системы [18]. Полный факторный эксперимент представляет собой классический подход, при котором тестируются все возможные комбинации уровней факторов. Для системы с (k) факторами, каждый из которых варьируется на (n) уровнях, общее количество необходимых экспериментов составляет (n^k) .

В настоящем исследовании четыре рабочих параметра, температура исходной воды T_1 , температура охлаждающей жидкости T_2 , расход исходной воды V_1 и расход охлаждающей жидкости V_2 , варьировались на двух уровнях, низком уровне фактора L_1 и высоком уровне фактора L_2 . Полный факторный план 2^4 потребовал бы проведения 16 экспериментов для оценки всех возможных комбинаций. Несмотря на статистическую полноту, такой подход становится неэффективным при ограниченных ресурсах, времени или доступности материалов, особенно на ранних этапах разработки процесса. Для решения этой проблемы был применён ортогональный план эксперимента (ОПЭ), разработанный японским инженером Геничи Тагучи [19]. В отличие от полного факторного плана, ОПЭ использует дробно-факторный подход, основанный на ортогональных массивах, заранее определённых матрицах, отбирающих репрезентативное подмножество комбинаций уровней факторов. Эти комбинации подбираются таким образом, чтобы каждый уровень каждого фактора встречался одинаковое количество раз и был сбалансирован по отношению к уровням всех остальных факторов. Такая ортогональность обеспечивает возможность независимой оценки влияния каждого отдельного фактора, значительно снижая эффект смешения [8].

В данной работе был выбран ортогональный массив L_8 (2^7), требующий всего 8 экспериментальных прогонов, что на 50 % меньше по сравнению с полным факторным планом и при этом позволяющий надёжно оценивать главные эффекты факторов.

В. Выбор и структура ортогонального массива

Массив L_8 применим для экспериментов с до семи факторов, каждый из которых имеет два уровня. Поскольку в настоящем исследовании рассматривались только четыре фактора, оставшиеся три столбца массива не использовались (они могли бы быть зарезервированы для оценки эффектов взаимодействия, однако в данной работе взаимодействия не анализировались). В таблице 1 приведена экспериментальная схема, построенная на основе массива L_8 . Каждая строка соответствует одному экспериментальному прогону и задаёт уникальную комбинацию уровней факторов.

Таблица 1.

Экспериментальная схема на основе ортогонального массива L_8 с уровнями факторов.

№ опыта	T_1 (°C) – температура подачи	T_2 (°C) – температура охлаждения	V_1 (л/ч) – расход подачи	V_2 (л/ч) – расход охлаждающей среды
1	70 (L_1)	20 (L_1)	100 (L_1)	100 (L_1)
2	70 (L_1)	20 (L_1)	150 (L_2)	150 (L_2)
3	70 (L_1)	25 (L_2)	100 (L_1)	150 (L_2)
4	70 (L_1)	25 (L_2)	150 (L_2)	100 (L_1)
5	80 (L_2)	20 (L_1)	100 (L_1)	150 (L_2)
6	80 (L_2)	20 (L_1)	150 (L_2)	100 (L_1)
7	80 (L_2)	25 (L_2)	100 (L_1)	100 (L_1)
8	80 (L_2)	25 (L_2)	150 (L_2)	150 (L_2)

Такая схема планирования гарантирует, что для каждого фактора выполняется по четыре эксперимента на низком уровне и четыре на высоком уровне, что обеспечивает возможность прямого сопоставления эффектов, обусловленных изменением уровня данного фактора.





С. Экспериментальная установка и процедура

Авторами были проведены эксперименты на лабораторной установке воздушно-зазорной мембранной дистилляции, расположенной в PURA-Lab, входящем в состав Plataforma Solar de Almería (PSA), эксплуатируемой CIEMAT, Испания. Фотография экспериментальной AGMD установки, использованной в данном исследовании, представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Экспериментальной установка AGMD

Установка воздушно-зазорной мембранной дистилляции оснащена плосколистовой гидрофобной мембраной из политетрафторэтилена. Конструкция включает горячий (исходный) и холодный (дистилляционный) каналы, разделённые воздушным зазором толщиной 3 мм. Механизм транспорта пара через мембрану и воздушный зазор представлен на рисунке 3, где выделены канал подачи горячей воды, путь диффузии пара и зона конденсации.

Потоки исходной воды и охлаждающей жидкости циркулировали в противоточном режиме с использованием откалиброванных центробежных насосов. Температура в каналах поддерживалась с помощью термостатированных водяных бань с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Дистиллят собирался в охлаждаемый сосуд и взвешивался через фиксированные промежутки времени. Удельная электропроводность продукта измерялась с помощью откалиброванного кондуктометра с погрешностью $\pm 0,1 \text{ мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$.

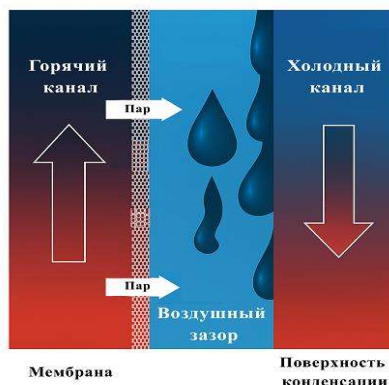


Рис. 3. Схематическое представление принципа мембранной дистилляции.

Каждый эксперимент проводился до достижения установившегося режима 90–180 мин, который определялся как изменение потока дистиллята менее чем на $\pm 2\%$ в течение 30 минут. В ходе испытаний фиксировались три ключевых показателя эффективности:

Поток дистиллята (J , л/ч),

Общая масса дистиллята (m , кг),

Удельная электропроводность продукта (σ , $\text{мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$).

Д. Методика расчёта эффектов факторов и их относительной значимости

После завершения экспериментов данные обрабатывались с применением таблиц отклика метода Тагучи описанных в литературе [9].



Суммарный отклик фактора на уровне L_1 и L_2 определяется как сумма всех экспериментальных откликов, полученных при соответствующем уровне:

$$K_1 = \sum_{j=1}^n Y_{2j}, \quad K_2 = \sum_{j=1}^n Y_{2j} \quad (1)$$

где Y_{2j} - значение отклика в j -м эксперименте при уровне L_i , n — число экспериментов на каждом уровне.

Средний отклик фактора для каждого уровня вычисляется как:

$$k_1 = \frac{K_1}{n}, \quad k_2 = \frac{K_2}{n} \quad (2)$$

Влияние фактора на отклик оценивается по диапазону эффекта:

$$\Delta = |k_1 - k_2| \quad (3)$$

где чем больше значение Δ , тем сильнее влияние данного фактора на исследуемый отклик.

Относительная значимость i фактора определяется нормированием диапазона эффекта:

$$P_i(\%) = \frac{\Delta_i}{\sum_{i=1}^m \Delta_i} \times 100 \quad (4)$$

где m - общее число факторов.

Фактор, характеризующийся наибольшим значением диапазона эффекта Δ , считается наиболее значимым, что указывает на его максимальное влияние на исследуемый отклик. Оптимальный уровень каждого фактора выбирается в зависимости от поставленной целевой функции. При необходимости максимизации отклика, такого как поток рассола или выход продукта, предпочтение отдаётся тому уровню фактора, при котором среднее значение отклика является наибольшим. Напротив, при минимизации отклика, например электропроводности продукта, оптимальным считается уровень, обеспечивающий наименьшее среднее значение отклика [18], [20],

В данной работе одновременно рассматривались несколько целевых функций, включая *максимизацию* потока рассола, *максимизацию* суммарной массы полученного дистиллята, а также *минимизацию* электропроводности продукта. Поскольку оптимальные уровни факторов, соответствующие отдельным целям, не полностью совпадают, для выбора рабочих условий было использовано компромиссное решение.

Окончательный выбор параметров процесса осуществлялся с учётом ограничений, направленных на обеспечение высокого качества продукта при сохранении достаточной производительности. Целевым условием являлось достижение электропроводности продукта ниже $1,5 \text{ мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$ при одновременном обеспечении потока дистиллята выше $115 \text{ л} \cdot \text{ч}^{-1}$.

F. Валидация и воспроизводимость

Для обеспечения надёжности оптимальную комбинацию параметров ($T_1 = 70^\circ\text{C}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$, $V_1 = 150 \text{ л/ч}$, $V_2 = 100 \text{ л/ч}$) проверяли в трёхкратной повторности. Относительное стандартное отклонение (RSD) потока дистиллята и удельной электропроводности по результатам повторных испытаний составило менее 3%, что подтверждает стабильность процесса и воспроизводимость результатов в определённых условиях.

G. Допущения и ограничения

В данном исследовании предполагается отсутствие эффектов взаимодействия между факторами, поскольку ортогональный массив L_8 не позволяет идентифицировать взаимодействия высокого порядка из-за смешивания эффектов. Хотя основные эффекты факторов доминируют в большинстве тепловых процессов разделения [21], в будущих работах с применением расширенных массивов или метода поверхности отклика (RSM) можно будет изучить взаимное влияние параметров. Дополнительно следует отметить, что вопросы загрязнения мембраны и её долгосрочной стабильности в работе не рассматривались. Все эксперименты проводились на синтетическом растворе NaCl с концентрацией $35 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ в течение коротких временных интервалов (от 2 до 3 часов).

Таким образом, использование метода Тагучи для планирования эксперимента позволило эффективно оптимизировать производительность AGMD при минимальном





количестве испытаний, обеспечив практически значимые рекомендации для проектирования и эксплуатации системы.

3. Результаты и обсуждение

Экспериментальная исследования на основе метода Тагучи дала чёткие и количественно обоснованные сведения о влиянии рабочих параметров на производительность AGMD. Как показано в Таблице 2, поток дистиллята варьировался от 36,72 л/ч до 122,11 л/ч, масса дистиллята от 0,158 кг до 1,328 кг, а удельная электропроводность в диапазоне 1,23–3,69 мкСм·см⁻¹. Этот диапазон электропроводности свидетельствует о высокой степени очистки в оптимальных режимах, но также указывает на возможное частичное смачивание мембраны в менее благоприятных условиях.

Таблица 2.

Результаты анализа по методу Тагучи влияния рабочих параметров на поток дистиллята в AGMD установке.

Фактор	T ₁	T ₂	V ₁	V ₂
K ₁	429.72	343.05	295.22	300.75
K ₂	230.35	317.02	364.85	359.32
k ₁	107.43	85.76	73.81	75.19
k ₂	57.59	79.26	91.21	89.83
Диапазон (R)	49.84	6.50	17.40	14.64
Относительный вклад (%)	56.4 %	7.4 %	19.7 %	16.6 %
Порядок значимости (ранжирование)	T ₁ > V ₁ > V ₂ > T ₂			
Оптимальная комбинация	L ₁ L ₁ L ₂ L ₂ (70 °C, 20 °C, 150 л/ч, 150 л/ч)			

Анализ влияния факторов по методу Тагучи показал, что температура исходной воды (T₁) является доминирующим параметром. По результатам оценки потока дистиллята, на долю T₁ приходится 56,4 % общей вариации (Δ=49,84 л/ч), что значительно превышает вклад расхода исходной воды V₁ (19,7 %), расхода охладителя V₂ (16,6 %) и температуры охладителя T₂ (7,4 %).

Особенно примечательным оказалось то, что повышение T₁ с 70 °C до 80 °C привело к снижению потока дистиллята более чем на 60 %, со среднего значения 107,43 л/ч при 70 °C до 57,59 л/ч при 80 °C. Это противоречит теоретическому ожиданию, согласно которому рост температуры исходной воды должен увеличивать парциальное давление пара и, следовательно, поток продукта.

Наблюдаемое снижение объясняется усилением тепловой и концентрационной поляризации пограничного слоя, что уменьшает эффективную разность температур через мембрану, а также, частичным смачиванием мембраны при повышенных температурах. Эта гипотеза получает убедительное подтверждение из данных по удельной электропроводности, среднее значение проводимости возросло с 1,54 мкСм·см⁻¹ при T₁=70 °C до 2,15 мкСм·см⁻¹ при T₁=80 °C, что свидетельствует о проникновении ионов соли через повреждённые участки мембраны.

Как видно из таблицы 3, влияние T₁ на общую массу дистиллята ещё более выражено, её вклад составляет 69,8 % от общей вариации, что подчёркивает высокую чувствительность долгосрочного выхода продукта к термической стабильности процесса.

Вторым по значимости фактором, влияющим на массу дистиллята, оказался расход охладителя (V₂) с вкладом 19,1 %. При меньшем расходе (V₂=100 л/ч) масса дистиллята составила 0,726 кг, тогда как при большем расходе (V₂=150 л/ч) всего 0,534 кг. Это позволяет предположить, что более медленный поток охлаждающей жидкости способствует более полной конденсации пара и лучшему поддержанию движущей силы процесса во времени, в то время как интенсивное охлаждение может излишне снижать температуру конденсации и, как следствие, уменьшать градиент парциального давления основной движущей силы мембранной дистилляции.



Таблица 3.

Факторный анализ влияния эксплуатационных параметров на суммарную массу дистиллята в AGMD.

Фактор	k (кг) L ₁	k (кг) L ₁	k (кг) L ₂	k (кг) L ₂	R (кг)	Относительный вклад (%)	Оптимальный уровень (макс. масса)
T ₁ (70 и 80 °C)	3.9209	0.9802	1.1210	0.2803	0.7000	69.8 %	70 °C (L ₁)
T ₂ (20 и 25 °C)	2.7180	0.6795	2.3239	0.5810	0.0985	9.8 %	20 °C (L ₁)
V ₁ (100 и 150 л/ч)	2.4969	0.6242	2.5450	0.6363	0.0120	1.2 %	150 л/ч (L ₂)
V ₂ (100 и 150 л/ч)	2.9049	0.7262	2.1370	0.5343	0.1920	19.1 %	100 л/ч (L ₁)
R					1.0005	100 %	

Как следует из таблицы 4, удельная электропроводность продукта одинаково чувствительна к трём факторам, температуре исходной воды (T₁), температуре охладителя (T₂) и расходу охладителя (V₂), на каждый из них приходится по 33,3 % вклада в общую вариацию отклика. В то же время расход исходной воды (V₁) не оказывает измеримого влияния на электропроводность ($\Delta=0$), что указывает на отсутствие связи между гидродинамикой со стороны подачи и целостностью мембраны.

Более высокая температура охладителя при T₂=25 °C и меньший расход охладителя при V₂=100 л/ч приводили к повышению удельной электропроводности, что дополнительно подтверждает тесную взаимосвязь между термическим режимом со стороны дистиллята и целостностью мембраны. Недостаточное охлаждение при повышенной T₂ или пониженный V₂ снижает эффективность конденсации, способствует повышению температуры в воздушном зазоре и может вызывать локальное нарушение гидрофобности мембраны и прорыв солей.

На основе полученных данных были определены оптимальные условия эксплуатации для каждой из целевых функций:

Максимизация потока дистиллята:	T ₁ = 70 °C, T ₂ = 20 °C, V ₁ = 150 л/ч, V ₂ = 150 л/ч;
Максимизация общей массы дистиллята:	T ₁ = 70 °C, T ₂ = 20 °C, V ₁ = 150 л/ч, V ₂ = 100 л/ч;
Минимизация удельной электропроводности:	T ₁ = 70 °C, T ₂ = 20 °C, V ₂ = 150 л/ч;

Таблица 4.

Факторный анализ влияния эксплуатационных параметров на электропроводность дистиллята в AGMD.

Фактор	k (мкС м·см ⁻¹) L ₁	k (мкСм ·см ⁻¹) L ₁	k (мкСм ·см ⁻¹) L ₂	k (мкСм ·см ⁻¹) L ₂	R (мкСм·см ⁻¹)	Относительный вклад (%)	Оптимальный уровень (мин. проводимость)
T ₁ (70 и 80 °C)	6.15	1.537	8.61	2.152	0.615	33.3 %	70 °C (L ₁)
T ₂ (20 и 25 °C)	6.15	1.537	8.61	2.152	0.615	33.3 %	20 °C (L ₁)
V ₁ (100 и 150 л/ч)	7.38	1.845	7.38	1.845	0.000	0.0 %	любой
V ₂ (100 и 150 л/ч)	8.61	2.152	6.15	1.537	0.615	33.3 %	150 л/ч (L ₂)
R					1.845	100 %	





Практически приемлемый компромиссный режим $T_1=70^\circ\text{C}$, $T_2=20^\circ\text{C}$, $V_1=150\text{ л/ч}$, $V_2=100\text{ л/ч}$, обеспечил поток дистиллята 118 л/ч при удельной электропроводности $1,3\text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$, что демонстрирует успешный баланс между высокой производительностью и превосходным качеством продукта. Данная конфигурация особенно пригодна для интеграции с низкопотенциальными солнечными термальными системами, которые надёжно обеспечивают нагрев воды до $70\text{--}80^\circ\text{C}$, не создавая при этом риска повреждения мембраны.

Метод Тагучи не только позволил выявить ключевые факторы, определяющие эффективность AGMD, но и обнаружил критические эксплуатационные ограничения. Результаты показывают, что максимизация температуры не ведёт к максимизации производительности, умеренные и стабильные условия обеспечивают значительно лучшие эксплуатационные характеристики. Полученные данные формируют прочную эмпирическую основу для масштабирования AGMD технологий в системах опреснения, основанных на возобновляемых источниках энергии.

4. Заключение

В данной работе ортогональное экспериментальное планирование на основе метода Тагучи было успешно применено для оптимизации работы установки воздушно-зазорной мембранной дистилляции в целях термического опреснения.

Результаты показали, что температура исходной воды T_1 является доминирующим фактором, вносящим более 56 % в изменчивость потока дистиллята и почти 70 % в массу дистиллята, а также существенно влияющим на качество продукции. Вопреки традиционным представлениям, режим при $T_1=80^\circ\text{C}$ привёл к снижению производительности более чем на 60 %, что объясняется поляризацией пограничного слоя и частичным смачиванием мембраны, подтверждённым ростом электропроводности до $>2,1\text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$.

Оптимальный режим эксплуатации был достигнут при $T_1=70^\circ\text{C}$, $T_2=20^\circ\text{C}$, $V_1=150\text{ л/ч}$, $V_2=100\text{ л/ч}$, обеспечив высокий поток (118 л/ч) и отличное качество продукта. Применение ортогонального планирования эксперимента позволило сократить объём экспериментальных работ на 50 % по сравнению с полным факторным планом, сохранив при этом статистическую надёжность и интерпретируемость результатов.

Полученные выводы дают практические, основанные на данных рекомендации для масштабирования AGMD систем, работающих от низкопотенциального или солнечного тепла, особенно в засушливых регионах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке фундаментального проекта № FL-9024093713, реализуемого Физико-техническим институтом имени С. Азимова Академии наук Республики Узбекистан.

Литература

- [1]. Bonazzi D. Imminent risk of a global water crisis, warns the UN World Water Development Report 2023 [Electronic resource]. – 2024. – Available: <https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023> (accessed 11.06.2025).
- [2]. Krishnan J.N., Venkatachalam K.R., Ghosh O., Jhaveri K., Palakodeti A., Nair N. Review of Thin Film Nanocomposite Membranes and Their Applications in Desalination // Frontiers in Chemistry. – 2022. – Vol. 10. – DOI: 10.3389/fchem.2022.781372.
- [3]. Ministry of Ecology of the Republic of Uzbekistan. National State of the Environment Report: Uzbekistan [Electronic resource]. – 2024. – Available: <https://www.iisd.org/system/files/2024-02/uzbekistan-state-of-the-environment-ru.pdf> (accessed 04.08.2025).
- [4]. EU Blue Economy Observatory. Desalination [Electronic resource]. – European Commission. – Available: https://blue-economy-observatory.ec.europa.eu/eu-blue-economy-sectors/desalination_en (accessed 11.06.2025).
- [5]. Ahmed M.A., Amin S., Mohamed A.A. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, No. 4. – Article e14908. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14908.





- [6]. Camacho L., Dumée L., Zhang J., Li J.D., Duke M., Gomez J., Gray S. Advances in Membrane Distillation for Water Desalination and Purification Applications // *Water*. – 2013. – Vol. 5, No. 1. – P. 94–196. – DOI: 10.3390/w5010094.
- [7]. Alkhudhiri A., Darwish N., Hilal N. Membrane distillation: A comprehensive review // *Desalination*. – 2012. – Vol. 287. – P. 2–18. – DOI: 10.1016/j.desal.2011.08.027.
- [8]. Jing L., Sun J., Zhang Y., Chen J., Guo F. Experimental Investigation of Temperature Polarization near Membrane Surface During Air Gap Membrane Distillation Processes // *Membranes*. – 2025. – Vol. 15, No. 6. – Article 185. – DOI: 10.3390/membranes15060185.
- [9]. Roy R.K. Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement. – New York: Wiley, 2001. – 538 p.
- [10]. Khalifa A.E., Lawal D.U. Application of response surface and Taguchi optimization techniques to air gap membrane distillation for water desalination – A comparative study // *Desalination and Water Treatment*. – 2016. – Vol. 57, No. 59. – P. 28513–28530. – DOI: 10.1080/19443994.2016.1189850.
- [11]. PURA-Lab – Automated Membrane Distillation Facility. Plataforma Solar de Almería [Electronic resource]. – Available: <https://www.psa.es> (accessed 14.11.2025).
- [12]. El-Bourawi M.S., Ding Z., Ma R., Khayet M. A framework for better understanding membrane distillation separation process // *Journal of Membrane Science*. – 2006. – Vol. 285, No. 1–2. – P. 4–29. – DOI: 10.1016/j.memsci.2006.08.002.
- [13]. Minitab Support. Response Table for Analyze Taguchi Design [Electronic resource]. – Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/response-table/> (accessed 14.11.2025).
- [14]. Khayet M. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A review // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 164, No. 1–2. – P. 56–88. – DOI: 10.1016/j.cis.2010.09.005.
- [15]. Gryta M. Long-term performance of membrane distillation process // *Journal of Membrane Science*. – 2005. – Vol. 265, No. 1–2. – P. 153–159. – DOI: 10.1016/j.memsci.2005.04.049.
- [16]. Leman M. Central Asian and Northern Cyprus Water Desalination Experience // *American Journal of Water Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 10, No. 3. – P. 48–53. – DOI: 10.11648/j.ajwse.20241003.11.
- [17]. Tiwari A., Rathod M.K., Kumar A. A comprehensive review of solar-driven desalination systems and its advancements // *Environment, Development and Sustainability*. – 2023. – Vol. 25, No. 2. – P. 1052–1083. – DOI: 10.1007/s10668-021-02040-5.
- [18]. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. – 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. – 730 p.
- [19]. Roy R.K. A Primer on the Taguchi Method. – Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1990. – 247 p.
- [20]. Shahu V.T., Thombre S.B. Air gap membrane distillation: A review // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. – 2019. – Vol. 11, No. 4. – DOI: 10.1063/1.5063766.

