



НОВЫЕ МАСЛООХЛАДИТЕЛИ МОХ: СОЧЕТАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ

Канд. техн. наук **Н.В.ТОВАРАС** ООО НПФ «Химхолодсервис»,
канд. техн. наук **В.П.ЕЛЬЧИНОВ**, канд. техн. наук **А. Л.ШУЯКОВ** ОАО «Криогенмаш»

Научно-производственная фирма «Химхолодсервис» совместно с фирмами HOWDEN и SES International организует сборочное производство аммиачных винтовых компрессорных агрегатов. При этом фирма «Химхолодсервис» будет изготавливать значительную часть комплектующих (маслоохладители, маслосепараторы, маслонасосы, фильтры и т.д.). Естественно, их конструкция и технические характеристики должны отвечать мировому уровню.

На энергетические характеристики и ресурс винтового холодильного агрегата существенно влияет эффективность работы маслоохладителя. Основная функция этого аппарата – поддержание в заданном интервале значений температуры масла, от которой напрямую зависят его вязкость, а следовательно, смазывающие и уплотняющие свойства.

Специфика теплоносителей, участвующих в теплообмене в маслоохладителе (с одной стороны, вода, которая имеет высокую теплопроводность и может загрязнять поверхность теплообмена из-за отложений твердой фазы, с другой стороны, масло – вязкая жидкость с небольшой теплопроводностью), предъявляет противоречивые требования к конструкции эффективных теплообменных аппаратов этого класса. Первое требование – разреженность теплообменного пространства, что связано с необходимостью очистки поверхности аппарата по воде, второе – высокая компактность поверхности в сочетании с сильными интенсифицирующими воздействиями на теплоотдачу при движении масла.

Традиционно применяемые для этой цели кожухотрубные аппараты с сегментными перегородками не вполне отвечают этим теплотехническим требованиям. Качество отечественных систем водоподготовки не позволяет применять в этих аппаратах трубы с внутренним диаметром менее 15 мм. Следовательно, габариты таких аппаратов велики. Кроме того, они имеют ряд конструктивных недостатков. Наличие зазоров между трубами и перегородками, перегородками и кожухом приводит к байпасным перетечкам масла, что ухудшает его теплоотдачу. Так, технологические зазоры между трубами и перегородками в 1 мм снижают интенсивность теплоотдачи в 1,6 раза по сравнению с теплоотдачей при «плотно посаженном» пучке труб. На практике же и такой зазор не выдерживается. Попытки решить эту проблему нетрадиционным способом, путем использования пластмассовых сегментных перегородок, привели к массовым отказам – «оплавлению» перегородок и выходу аппаратов из строя. На наш взгляд, теплогидравлические возможности этих теплообменников исчерпаны. Для дальнейшего снижения массы и габаритных размеров требуются более эффективные технические решения.

Исходя из вышесказанного научно-производственной фирмой «Химхолодсервис» освоено производство нового маслоохладителя МОХ, где сегментные перегородки заменены системой каналов с развитой поверхностью теплообмена для движения масла.

Теплообменные элементы маслоохладителя МОХ (рис.1) представляют собой коаксиально расположенные трубы, об-

разующие кольцевые каналы [1]. Каналы заполнены насадкой (развитая поверхность теплообмена), играющей роль оребрения и турбулизатора. Плотное прилегание насадки к трубам обеспечено натягом. Движение теплоносителей прямоточно-противоточное (масло – между трубами по насадке, вода – внутри внутренних труб и снаружи наружных).

Для создания новой конструкции маслоохладителя потребовалось провести экспериментальные исследования теплоотдачи и гидродинамического сопротивления его теплообменных элементов при движении вязкой жидкости (масла) с целью получения обобщенных зависимостей, необходимых для расчета работы аппаратов на различных режимных параметрах, оценки влияния контактного термического сопротивления соединения «насадка – труба» и схемы движения теплоносителей.

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый циркуляционный контур. В качестве горячего теплоносителя использовали смесь турбинного Тп-22 и компрессорного Кп масел, в качестве холодного – воду.

Теплофизические свойства смеси масел вычисляли согласно закону аддитивности (кроме вязкости). Они описываются следующими зависимостями:

удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)

$$c_p = 1851 + 3,628t;$$

плотность, кг/м³

$$\rho = 891,665 - 0,666t;$$

теплопроводность, Вт/(м·К)

$$\lambda = 0,1432 - 0,715 \cdot 10^{-3}t,$$

где t – температура, °С.

Коэффициент кинематической вязкости определяли экспериментально при различных температурах в интервале 25...80 °С.

Он описывается зависимостью, м²/с:

$$\nu = (72,052 - 1,8379t + 1,331 \cdot 10^{-3}t^2) \cdot 10^{-6}.$$

Опытные модели маслоохладителя представляли собой кожухотрубные теплообменники «труба в трубе». Они состояли из трех коаксиальных труб диаметром 18×1,5; 34×2 и 70×2 мм длиной по 1500 мм каждая. Масло проходило по кольцевому пространству между первой и второй трубами, заполненному насадкой. Исследовали две модели с различной степенью натяга насадки (100 и 3000 Н). Каждую модель исследовали при трех вариантах подвода охлаждающего теплоносителя (воды):

- внутри внутренней трубы;
- снаружи наружной трубы;
- снаружи наружной трубы, а затем внутри внутренней.

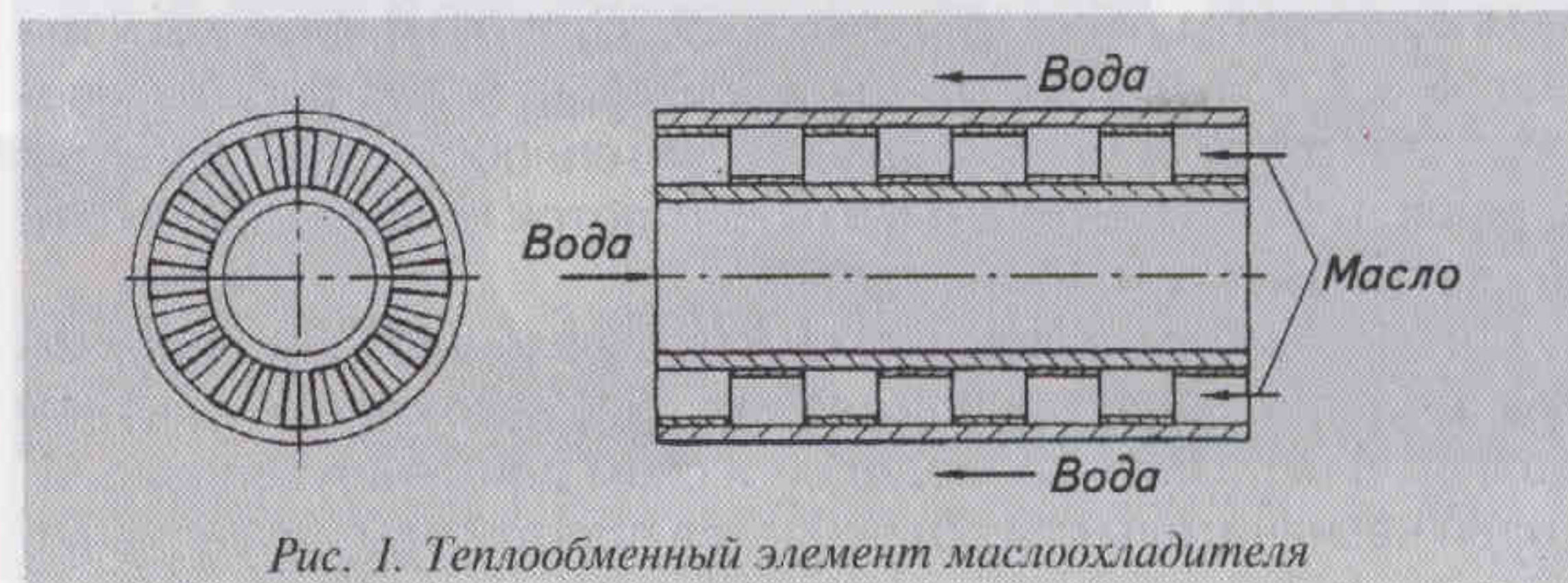


Рис. 1. Теплообменный элемент маслоохладителя

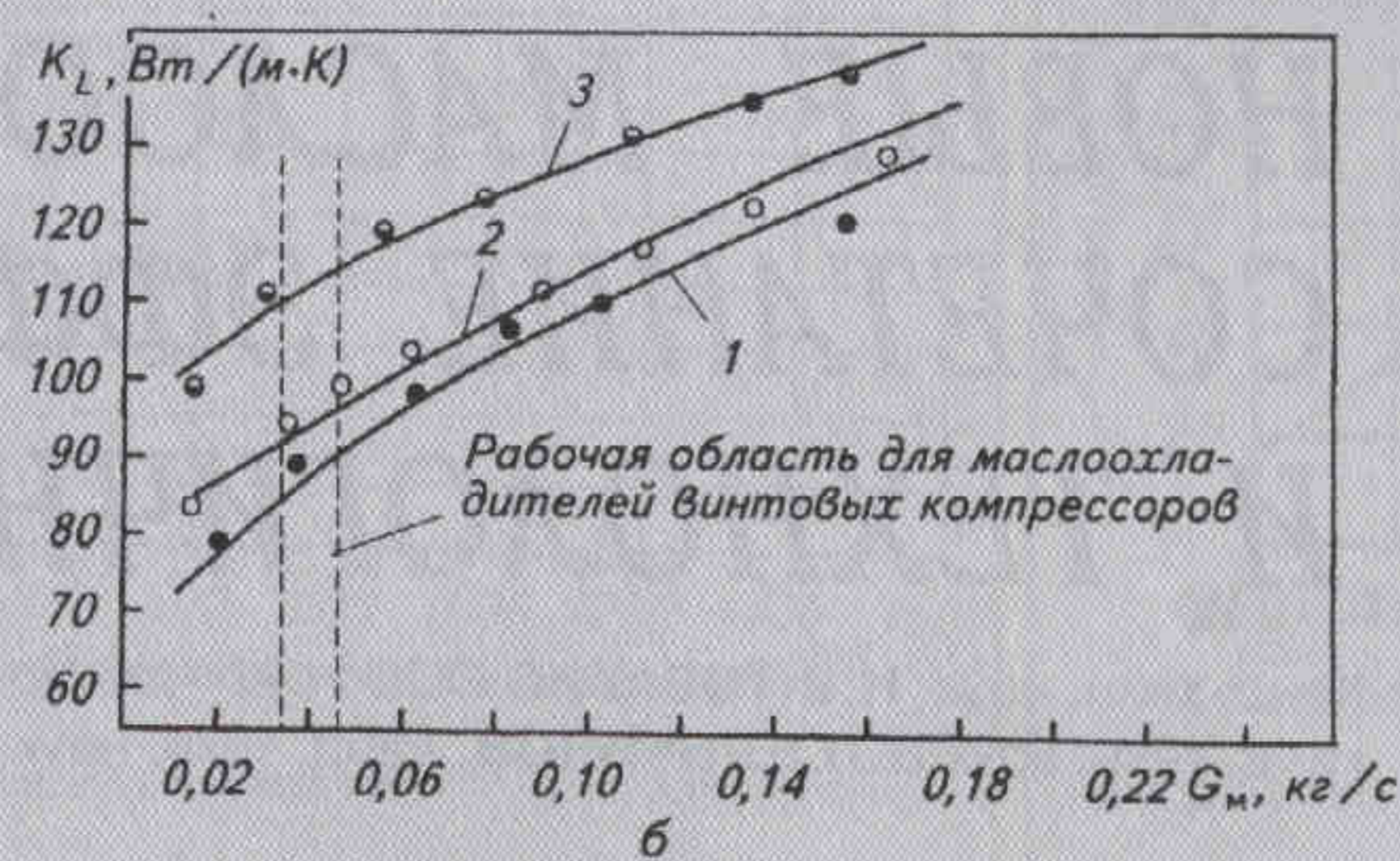
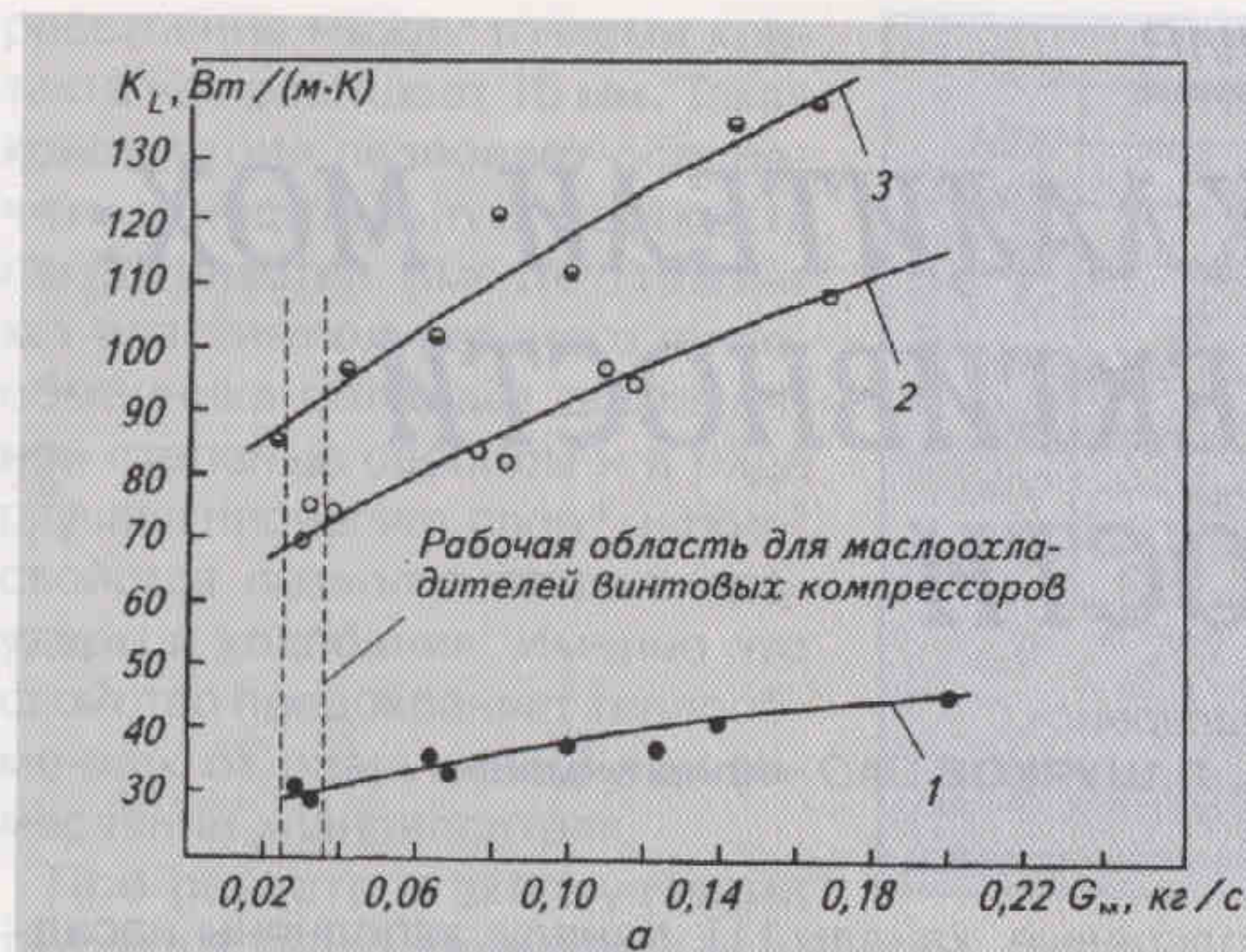


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопередачи K_L от массового расхода масла G_m в маслоохладителях с силой натяга 100 Н (а) и 3000 Н (б): 1 – вода внутри; 2 – вода снаружи; 3 – вода внутри и снаружи

Теплоотдачу исследовали методом энтальпий. По измеренным режимным параметрам (расходы масла и воды, температуры масла и воды на входе и выходе) вычисляли коэффициенты теплопередачи моделей, которые (при неизменных параметрах воды на входе в модель) позволяли судить о влиянии на теплообмен термического сопротивления места контакта и схемы подвода охлаждающего теплоносителя. Коэффициенты теплоотдачи со стороны масла, которые необходимы для получения обобщенных зависимостей, определяли численно. При этом теплоотдачу со стороны воды вычисляли по известным зависимостям (например [2], для течения в круглой трубе и кольцевом канале). Коэффициенты гидродинамического сопротивления находили на основании измеренных перепадов давлений на моделях.

Значения коэффициентов теплопередачи, отнесенные к единице длины исследованных моделей, представлены на рис. 2. Во всех случаях расход и температура воды на входе были неизменными.

Для модели с силой натяга 100 Н («слабый натяг») схема движения теплоносителей играет значительную роль (рис. 2, а). Подвод охлаждающего теплоносителя (воды) снаружи позволяет увеличить коэффициент теплопередачи в 2–3 раза. На наш взгляд, это объясняется двумя причинами: во-первых, снижением термического сопротивления из-за уменьшения зазоров между насадкой и наружной трубой (так, в случае, когда вода движется внутри, труба «сжимается» на 8 мкм относительно насадки, что приводит к ухудшению теплопередачи, при подаче воды снаружи наружная труба «сжимается» на 13 мкм, обжимая насадку, что приводит к улучшению теплопередачи); во-вторых, увеличением примерно в 2 раза основной поверхности теплообмена. При движении воды внутри и снаружи коэффициент теплопередачи возрастает еще в 1,4–1,6 раза. Очевидно, что вклад в это вносят увеличение основной поверхности теплообмена за счет внутренней трубы, а также КПД ребра, так как его высота уменьшается вдвое.

Для модели с силой натяга 3000 Н («сильный натяг») влияние схемы движения теплоносителей не столь значительно (рис. 2, б). Все три кривые, характеризующие зависимость коэффициента теплопередачи от массового расхода масла, располагаются в доверительном интервале $\pm 25\%$. Таким образом, сила натяга играет важнейшую роль в теплопередаче и должна быть обеспечена технологически.

Данные по теплопередаче показывают, что при среднем температурном напоре, равном 20 °С, и объемном расходе масла 3,3 л/мин (параметры, характерные для работы маслоохладителей винтовых агрегатов) теплообменный элемент длиной 1 м обеспечивает тепловой поток более 2000 Вт, что является высоким показателем.

Данные по гидравлическому сопротивлению в исследованных моделях представлены на рис. 3. Расхождение опытных данных для различных моделей и схем движения теплоносителей незначительно и объясняется просто: чем интенсивнее

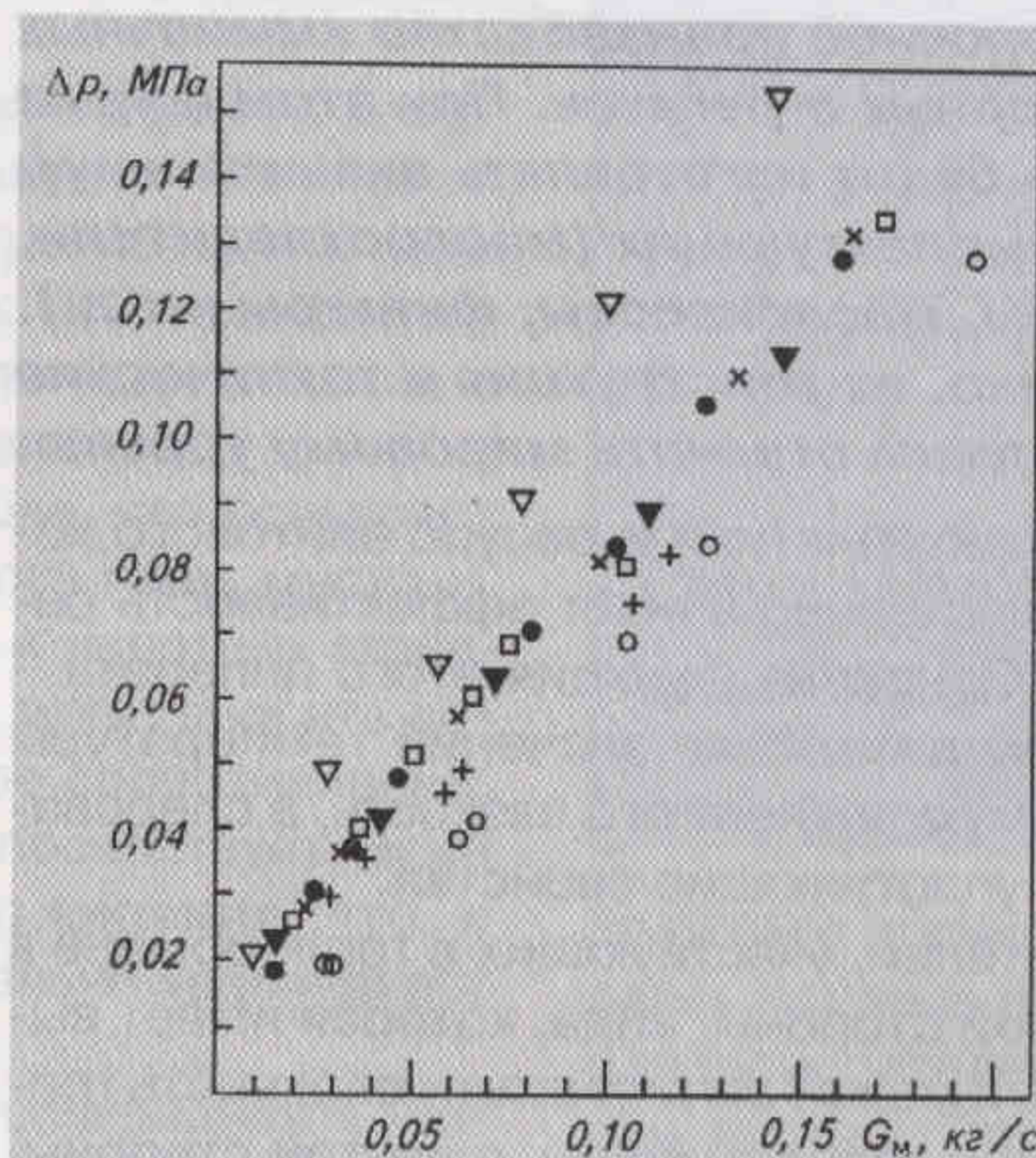


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления Δp от массового расхода масла G_m при различных силах натяга и схемах движения воды (обозначения схем см. рис. 2): о – 100 Н (схема 1); + – 100 Н (схема 2); □ – 100 Н (схема 3); ● – 3000 Н (схема 1); × – 3000 Н (схема 2); ▽ – 3000 Н (схема 3)

теплопередача в модели, тем ниже средневзвешенная температура масла, а следовательно, больше его вязкость и сопротивление.

На основании вышеприведенных опытных данных были получены и численно аппроксимированы обобщенные коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления со стороны масла, которые были положены в основу алгоритма и программы PROGMOX расчета аппаратов на любые режимные параметры, которая учитывает в том числе различные значения термического сопротивления загрязнений в зависимости от качества систем водоподготовки у заказчика.

Результаты исследований и расчетов были использованы при создании маслоохладителей МОХ на 120 и 90 кВт (табл. 1, рис. 4).

Маслоохладитель МОХ представляет собой трехпоточный кожухотрубный теплообменник. Движение теплоносителей прямоточно-противоточное. Аппараты, одноходовые по маслу и двухходовые по воде, имеют четыре трубные решетки, две масляные и три водяные полости. Диаметр условного прохода внутренних труб теплообменных элементов составляет 15 мм, что позволяет легко осуществлять их очистку. Межтрубное пространство достаточно разреженное (эквивалентный диаметр проходов от 20 до 40 мм), что обеспечивает длительную эксплуатацию их без очистки. Сборка теплообменных элементов маслоохладителей МОХ селективная – тщательно контролируется величина натяга насадки между трубами, определяющего термическое сопротивление контакта. Требования к сборке «криогенные» – аргоно-дуговая сварка с предварительной развальцовкой труб в трубных решетках. Особые требования к чистоте – предварительная обработка труб и корпусов (обезжиривание, протирка), что исключает попадание механических примесей и грязи в масляные полости.

Сравнение маслоохладителей МОХ с кожухотрубными ана-

Таблица 1

Параметры	МОХ 36-300-1,5 (для А350)	МОХ 18-200-2,0 (для А280)
Режимные параметры		
Объемный расход, л/мин	масла	120
	воды	225
Температура, °С	масла на входе	85
	на выходе	55
	воды на входе	25
Давление, МПа	масла (max)	4
	воды (max)	2
Перепад давлений по маслу (max), МПа	0,05	0,08
Тепловой поток, кВт	120	90
Конструктивные параметры		
Диаметр, мм	325	219
Длина, м	2,1	2,6
Число труб	36	18
Диаметр подсоединительных патрубков, мм	40	40
Масса, кг	280	180

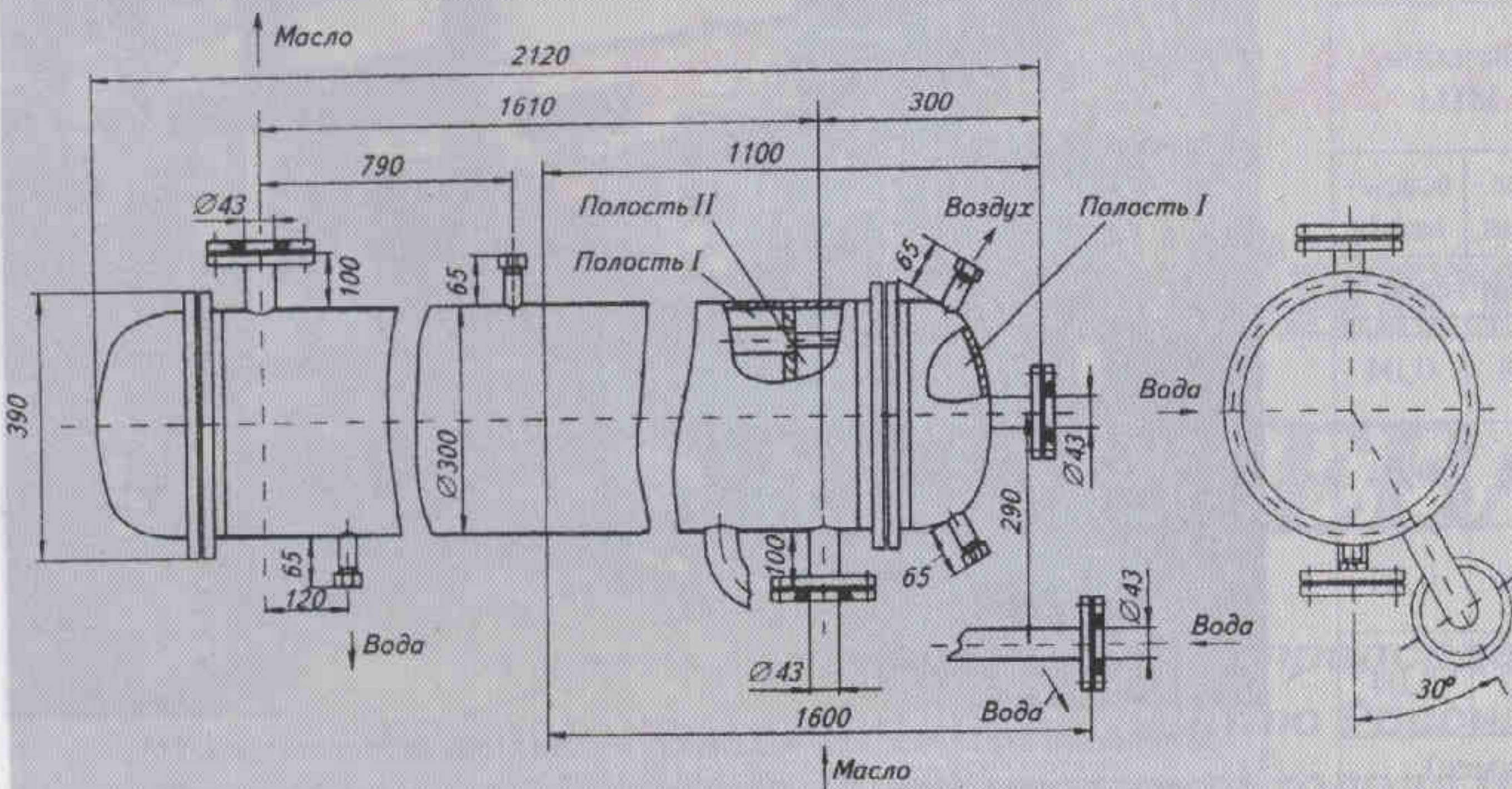


Рис. 4. Маслоохладитель МОХ36-300-1,5

логами, имеющими сегментные перегородки, показывает, что при одинаковых режимных параметрах габариты и масса разработанных маслоохладителей примерно в 2 раза меньше. В 5 раз меньше вместимость по маслу, что является их преимуществом.

Результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ позволяют сделать вывод о высокой эффективности маслоохладителей МОХ. Однако окончательное суждение об этом, а также об эксплуатационной надежности их тепловых и гидравлических показателей могли бы дать только долговременные испытания в составе действующих винтовых компрессорных агрегатов.

Промышленные испытания маслоохладителей сотрудники НПФ «Химхолодсервис» провели на штатных аммиачных компрессорных агрегатах 21А410-7-3 на Московском рыбокомбинате – ЗАО «Меридиан» (первый опытный двухпоточный маслоохладитель) и 21А280-7-3 на Санкт-Петербургском хладокомбинате № 7 (трехпоточный маслоохладитель МОХ, выпускаемый в настоящее время).

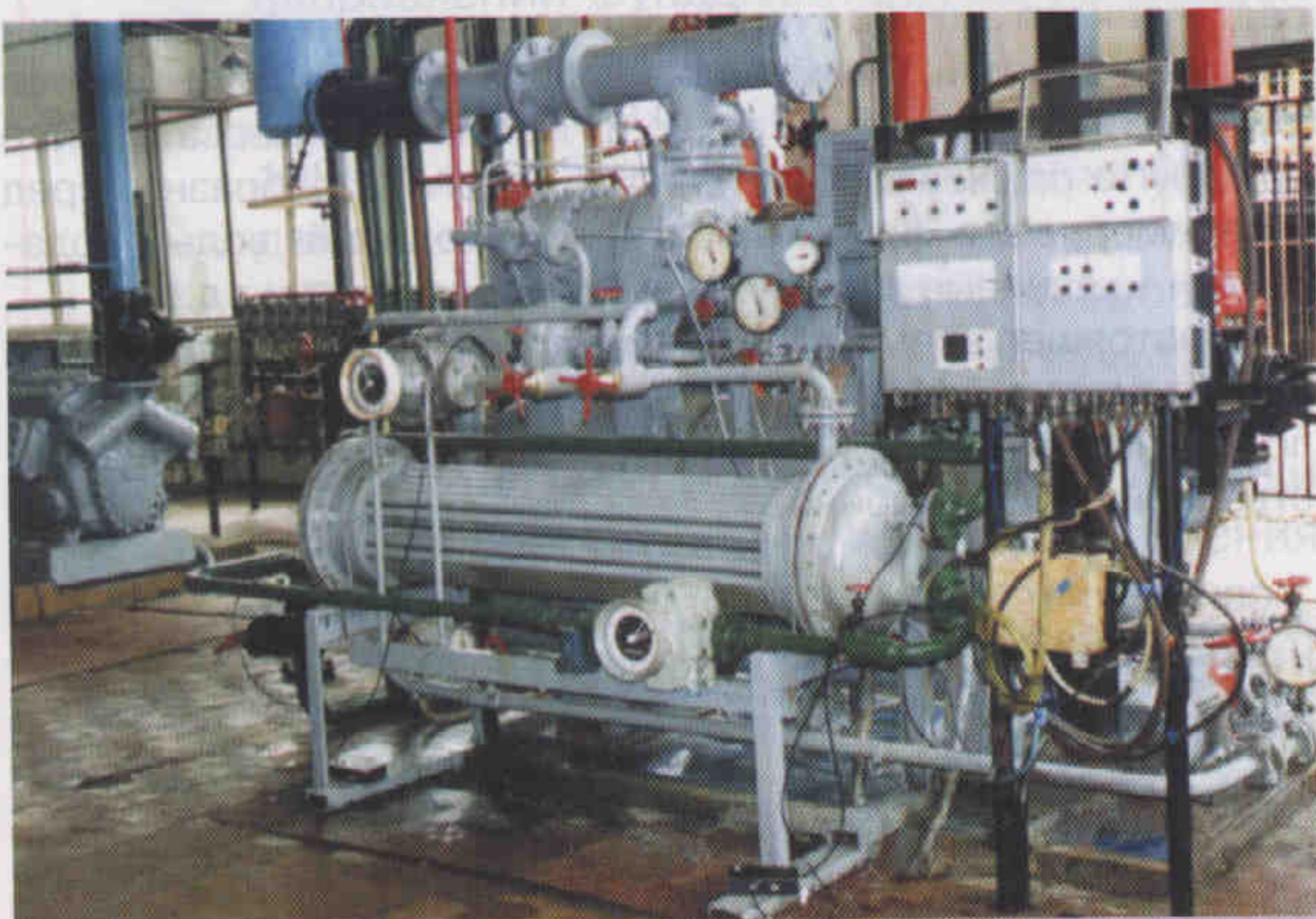
Конструкция первого маслоохладителя, испытанного на ЗАО «Меридиан», отличалась от окончательной конструкции МОХ, показанной на рис. 4. Дело в том, что его проектирование и изготовление были начаты на ранней стадии экспериментальных исследований, когда основные результаты еще не были получены. Поэтому наш первый опытный маслоохладитель был двухпоточным, без кожуха, содержал 56 теплообменных элементов (труб) и, естественно, имел большие габариты и массу. В дальнейшем, в связи с появлением более рациональных конструктивных идей, эта конструкция не была

запущена в серию.

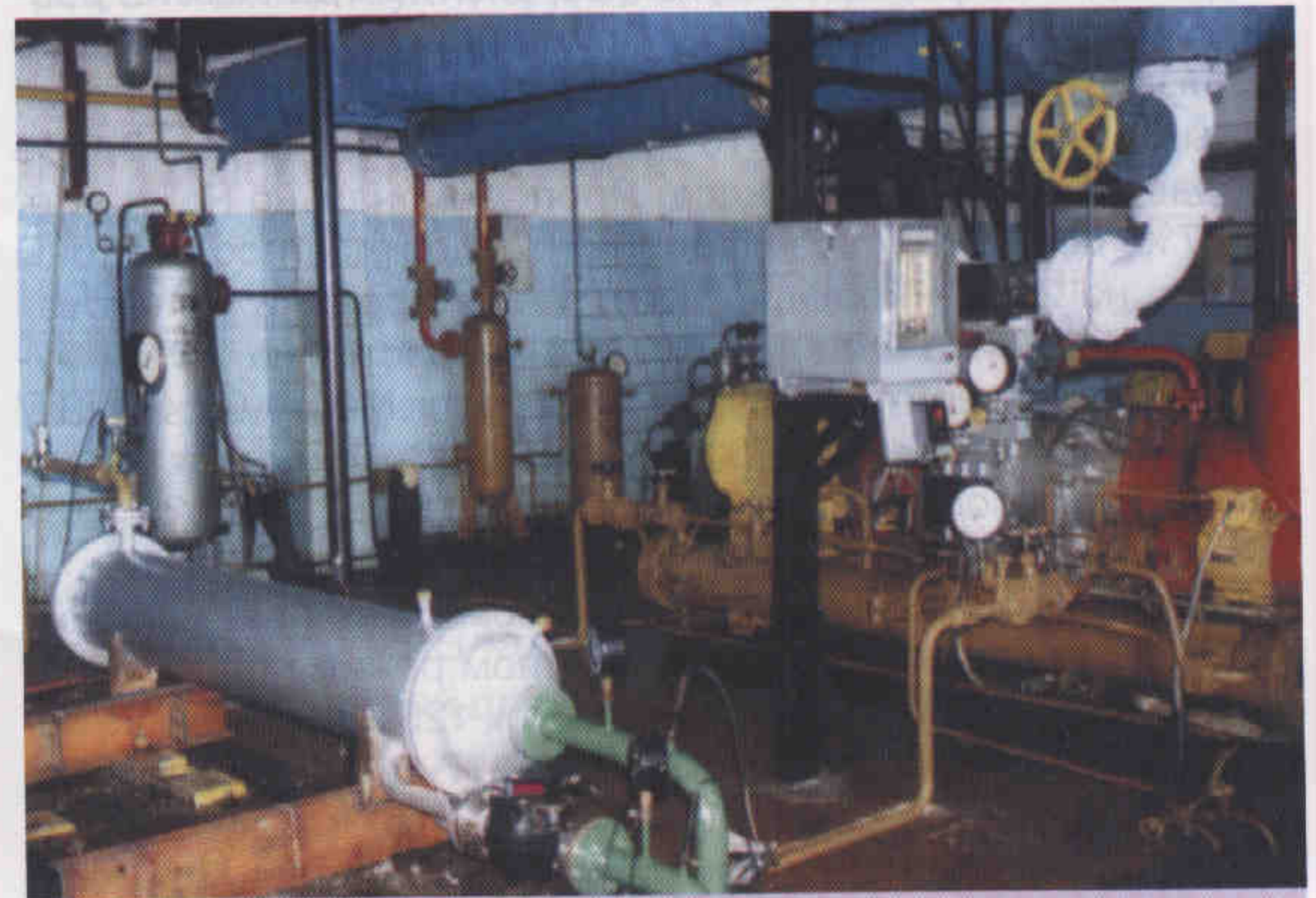
В ходе промышленных испытаний регистрировали расходы масла и воды (соответственно турбинный расходомер ППТ-32/6,4, кл. точности 0,25, с вторичным прибором ВП-1 и турбинный расходомер ППО 40-0,6СУ, кл. точности 0,25), входные и выходные температуры масла и воды (цифровые электронные термометры ТМТ7-3, кл. А, с вторичным прибором Щ-455, лабораторные термометры ТЛ-4 с ценой деления 0,1 °С), давления и перепады давлений по маслу и воде (образцовые манометры МТИ-1218-16кгс/см² –0,6 и МТИ-1218-10кгс/см² –0,6).

В табл. 2 представлены результаты нескольких серий испытаний маслоохладителя МОХ 36×300×1,5 на Санкт-Петербургском хладокомбинате № 7.

Анализ опытных данных показывает, что величина, характеризующая эффективность аппарата, $Q/\Delta t_n = k F$ (тепловой поток, приходящийся на 1 °С температурного напора) в первой серии испытаний составляла 3,8...4,0 кВт/°С, а во второй серии испытаний – 2,6...2,8 кВт/°С, т. е. примерно на 30 % ниже. Гидравлическое сопротивление по воде



Стенд для испытаний первого опытного двухпоточного маслоохладителя на Московском рыбокомбинате – ЗАО «Меридиан»



Стенд для испытаний трехпоточного маслоохладителя МОХ 36-300-1,5 на Санкт-Петербургском хладокомбинате № 7

Таблица 2

Режим	Объемный расход, л/мин		Температура*, °С		Давление*, МПа		Перепад давлений, МПа		Давление, МПа	
	масла	воды	масла	воды	масла	воды	масла	воды	нагнетания	всасывания
Первая серия испытаний (сразу после установки маслоохладителя)										
1	124	168	$\frac{48,4}{33,8}$	$\frac{24,1}{29,9}$	$\frac{1,53}{1,50}$	$\frac{0,20}{0,175}$	0,03	0,025	0,84	0,04
2	123	155	$\frac{50,4}{34,5}$	$\frac{24,5}{30,2}$	$\frac{1,53}{1,50}$	$\frac{0,20}{0,175}$	0,03	0,025	0,86	0,04
3	123	154	$\frac{51,1}{35,6}$	$\frac{24,8}{30,7}$	$\frac{1,54}{1,51}$	$\frac{0,20}{0,175}$	0,03	0,025	0,88	0,04
4	123	157	$\frac{52,6}{36,8}$	$\frac{25,4}{31,9}$	$\frac{1,54}{1,51}$	$\frac{0,20}{0,175}$	0,03	0,025	0,90	0,04
Вторая серия испытаний (после эксплуатации в течение 6 мес)										
1	136	169	$\frac{46,8}{36,0}$	$\frac{23,4}{28,0}$	$\frac{1,39}{1,35}$	$\frac{0,18}{0,15}$	0,04	0,065	0,72	0,09
2	136	168	$\frac{46,9}{36,2}$	$\frac{23,7}{28,2}$	$\frac{1,38}{1,34}$	$\frac{0,18}{0,15}$	0,04	0,065	0,72	0,09
3	136	170	$\frac{47,7}{36,8}$	$\frac{24,2}{28,8}$	$\frac{1,39}{1,35}$	$\frac{0,18}{0,15}$	0,04	0,065	0,72	0,09

*В числителе – на входе в маслоохладитель, в знаменателе – на выходе из него.

увеличилось после шестимесячной эксплуатации в 2,6 раза. Все это объясняется отложениями водяного камня на поверхности труб, что было подтверждено визуально после снятия крышек. Отложения на внутренних стенках труб и трубных решетках вследствие высокого содержания биологических составляющих солей кальция, магния, железа представляли собой рыхлую массу толщиной 1,5...2 мм с многочисленными пирамидальными шипами высотой 4...6 мм.

Однократная химическая очистка водяной полости МОХ раствором очистителя «BRITE BOWL PLUS» 10%-ной концентрации в течение 8 ч с последующей промывкой водой позволила восстановить первоначальные тепловые и гидравлические характеристики маслоохладителя.

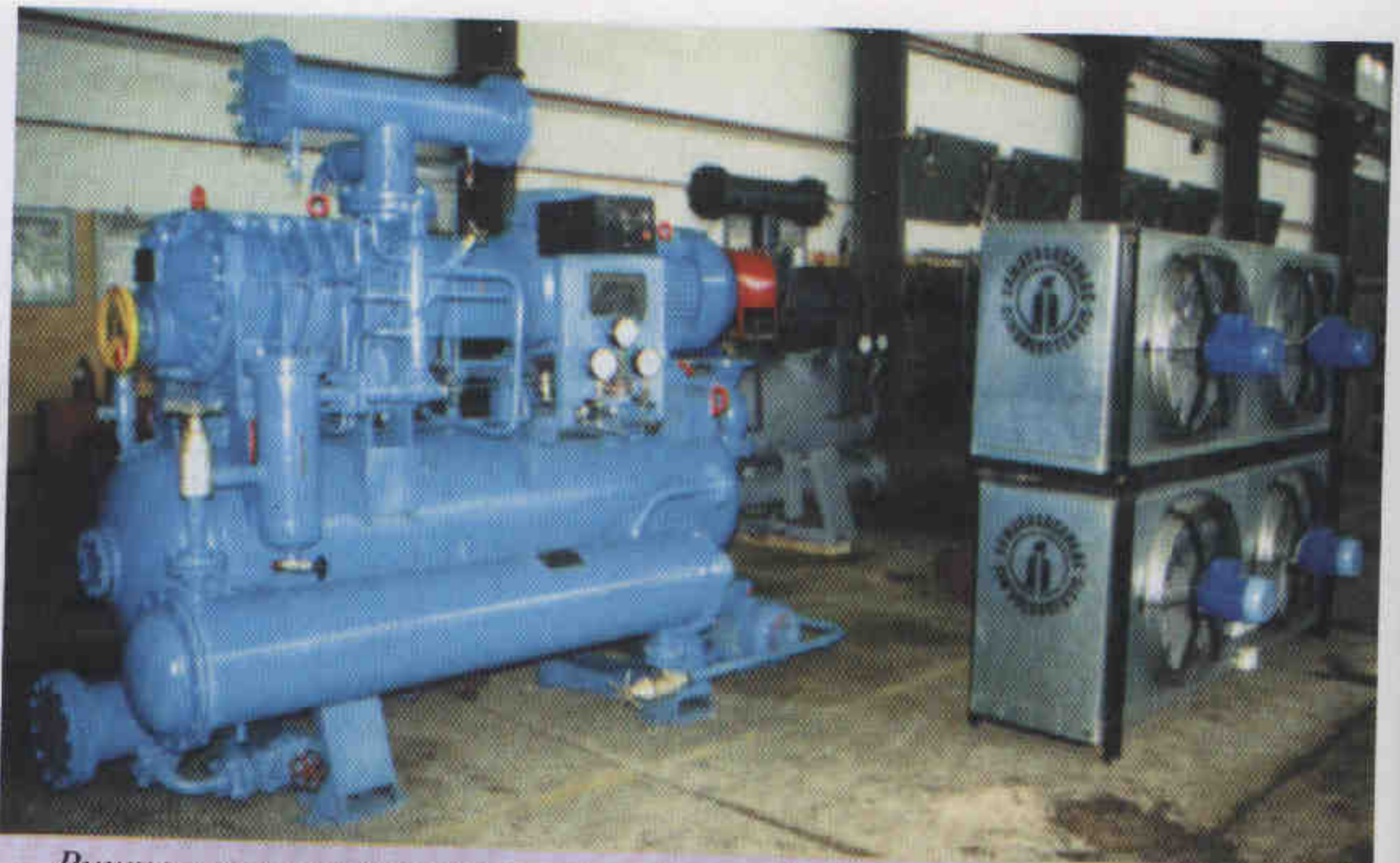
Вместе с тем увеличения гидравлического сопротивления масляной полости после шестимесячной эксплуатации не обнаружено, что подтвердило сделанный до испытаний вывод о том, что насадка не является объектом для твердых отложений из масла.

Как видно из табл. 2, маслоохладитель испытывали в условиях, отличных от расчетных, – при более низких температурных напорах (логарифмический напор $\Delta t_n \approx 15^\circ\text{C}$) и, следовательно, тепловых нагрузках.

Проведем пересчет полученных опытных данных на расчетные условия (см. табл. 1). При средней температуре 70°C вязкость масла уменьшится по сравнению с условиями испытаний вдвое ($22,5 \cdot 10^{-6}$ вместо $45 \cdot 10^{-6}$ м²/с). Вдвое возрастет число Рейнольдса. Пропорционально $Re^{0,33}$, т. е. на 27%, повысится коэффициент теплоотдачи со стороны масла, на 20% – коэффициент теплопередачи. Следовательно, величина $Q/\Delta t_n = kF$ также возрастет на 20% и будет равна для «чистого» маслоохладителя МОХ 4,6...4,8 кВт/°С; для загрязненного – 3,1...3,4 кВт/°С. При этом тепловая нагрузка составит соответственно 185...193 и 125...137 кВт.

Таким образом, даже в загрязненном состоянии маслоохладитель МОХ 36x300x1,5 в расчетном режиме будет обеспечивать минимальный тепловой поток 125 кВт, т. е. выше необходимого для агрегатов 21A410-7-1 (7-3, 2-1, 2-3), 2A350-7-1 (7-3, 2-3, 2-1).

Испытания подтвердили высокую эффективность маслоохладителя. Аппарат имеет большой запас по тепловому потоку, способен долговременно сохранять высокую интенсивность



Винтовые компрессорные агрегаты с маслоохладителями МОХ, выпускаемые НПФ "Химхолодсервис"



Монтаж на производственной базе «Нахабино» винтового компрессорного агрегата 21A410-7-3 с маслоохладителем МОХ 36-300-1,5

теплообмена, поддерживать малое сопротивление по маслу и воде, несмотря на значительные отложения водяного камня.

В результате исследовательских и опытно-конструкторских работ создан теплообменный аппарат – маслоохладитель, не уступающий по массогабаритным показателям зарубежным образцам. Конструкция теплообменных элементов имеет потенциальную возможность для дальнейшего повышения эффективности. Исследования в этом направлении продолжаются.

Конструкция теплообменных элементов позволяет компоновать аппараты не только по кожухотрубной схеме, но и непосредственно как «труба в трубе», что расширяет их функциональные возможности. Применение аппаратов не ограничивается функцией маслоохладителя, но их можно использовать также при других различных сочетаниях жидких и газообразных сред (например, вода-фреон – получение «ледяной» воды, вода-воздух – концевые холодильники компрессоров и т.д.).

В настоящее время НПФ "Химхолодсервис" оснащает маслоохладителями МОХ аммиачные и фреоновые винтовые холодильные агрегаты и машины, выпускаемые на производственной базе Нахабино.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. №1702146 СССР.
2. Исаченко В.И., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия. 1975.

125422, Москва, ул. Костякова, 12, офис 96.
Тел.: (095) 210-80-19, 210-45-11,
976-48-04, 210-53-11.
Факс: (095) 976-30-60.